



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Análisis de la vulnerabilidad de la costa catalana mediante el método *smartline*

Treball realitzat per:

Ana María Serrano Ureña

Dirigit per:

Jose Antonio Jiménez Quintana

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 19 de juny de 2014

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental.

TREBALL FINAL DE GRAU

Índice

Resumen	2
1. Introducción.....	3
1.2. Objetivo	5
1.3. Estructura.....	5
2. Vulnerabilidad Costera.....	6
2.1. Introducción	6
2.2. Métodos de análisis.....	6
2.3. Métodos de evaluación de la vulnerabilidad.....	8
2.4. Método Smartline.....	9
2.5. Evaluación de la vulnerabilidad	11
3. Área de estudio, datos y metodología	15
3.1. Área de Estudio.....	15
3.2. Datos	17
3.3. Metodología	18
3.4. Ejemplo	19
4. Resultados	25
4.1. Zona de Roses	26
4.2. Costa Brava (Tramo 1), de la frontera con Francia a l'Estartit	29
4.3. Costa Brava (Tramo 2), de L'Estartit a Blanes.....	34
4.4. Maresme	37
5. Discusión y Conclusiones	41
6. Referencias	43

Resumen

A nivel mundial se ha observado un aumento en las tendencias erosivas y en el número de inundaciones de las costas debido principalmente al cambio climático. Esto ha provocado una concienciación de todo el planeta sobre la necesidad de elaborar métodos para la valoración y gestión de las potenciales respuestas de las zonas costeras a estos cambios, especialmente en aquellas zonas en las que el desarrollo de la vida humana puede verse afectado.

Los estudios sobre la vulnerabilidad de las playas ahora y en el futuro son clave para hacer frente a los posibles riesgos asociados con los cambios en el litoral. Shaples (2006) propuso un método llamado *smartline* que se basa en la representación de la costa mediante simples líneas. El objetivo de este trabajo es adaptar el método Smartline para evaluar la vulnerabilidad costera a las especificidades de la costa catalana. El objetivo práctico es valorar su viabilidad para identificar zonas susceptibles a ser afectadas por los procesos costeros y su potencial utilidad para permitir a los gestores identificar zonas críticas en el litoral. La zona de aplicación del método es la costa del Maresme y la Costa Brava, escogidas para representar adecuadamente la variabilidad geomorfológica de nuestras costas.

A pesar de las diferencias geomorfológicas entre las dos zonas estudiadas se aprecian ciertas similitudes en los resultados, como que toda la zona estudiada es altamente vulnerable a las inundaciones provocadas por tormentas. La continua aparición en los últimos años de eventos de este tipo a lo largo de la costa catalana y los resultados obtenidos parecen sugerir la necesidad de valorar si es necesario una solución a largo plazo. Por otro lado los resultados de vulnerabilidad a erosión son más variados.

También se puede concluir que la aplicabilidad del método es muy alta y, dada su versatilidad es absolutamente recomendable usar una aproximación así para analizar la vulnerabilidad costera. En este trabajo se ha hecho un análisis de 2 zonas representativas de la costa catalana y, dados los resultados obtenidos, se recomienda extenderlo a la totalidad de la costa.

1. Introducción

Las zonas costeras de todo el mundo se ven sometidas constantemente a diferentes procesos que provocan un cambio continuo y a veces significativo de las mismas. Podemos entender la morfología del litoral como el resultado de varios procesos derivados de las cuencas fluviales (generación y transporte de sedimentos a la costa) junto a procesos relacionados con la dinámica marina (cambios en el nivel del mar, tormentas, vientos, oleajes...). El balance de éstos determinará el estado evolutivo de las costas y, en particular, de las costas sedimentarias las cuales pueden clasificarse como un sistema altamente dinámico y muy sensible a los cambios inducidos en la dinámica litoral, bien sea de forma natural o inducida por el hombre.

En este contexto, es de destacar que desde finales del siglo XIX se ha observado una tendencia de aumento de las temperaturas a nivel mundial debido, en gran parte, al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. Las temperaturas globales del aire y del mar han aumentado en el último siglo entre 0,4 y 0,8 °C (IPC, 2001). Estas tendencias de calentamiento se han acelerado durante este siglo con consecuencias tales como la expansión en superficie de los océanos en todo el mundo que, junto el deshielo de agua dulce, está causando que el nivel del mar aumente a un ritmo cada vez más rápido (IPCC, 2007). Como el calentamiento será más intenso en las zonas continentales interiores que sobre los océanos, el gradiente de presión atmosférica y, por lo tanto, el viento, se intensificarán a los márgenes del océano.

Es de vital importancia conocer y entender los efectos que el cambio climático tiene sobre las zonas del litoral. Estos efectos intensifican los procesos naturales que impactan en la costa, agravando su vulnerabilidad y aumentando su susceptibilidad. Cambios en la circulación atmosférica podrían cambiar la frecuencia en la que se producen las tormentas, de hecho ya se ha observado un incremento en la frecuencia de tormentas de invierno en zonas costeras de océanos (Bromirski et al., 2003) y se pronostica que esta tendencia va a continuar (IPCC, 2001).

Además, si tenemos en cuenta el efecto de la acción humana, que acentúa los procesos naturales y del cambio climático, concluimos que la estabilidad de la zona litoral está siendo perturbada a gran velocidad. Las zonas costeras altamente urbanizadas y aquellas que cuentan con grandes infraestructuras costeras son de

especial atención ya que los procesos naturales de adaptación se ven limitados e incluso impedidos. Es por ello que el comportamiento más común en las costas de todo el mundo es la erosión (Bird, 1985). En la costa catalana, un reciente estudio del CIIRC (2010) analiza la estabilidad costera durante la última década y se encontraron que aproximadamente el 72% de la costa sedimentaria era erosiva con una tasa media de erosión del orden de 1 metro al año.

Estos procesos, independientemente de su origen natural y/o antropogénico, se combinan con la existencia de un borde costero altamente urbanizado en el que progresivamente se ha ido acumulando una mayor cantidad de población, infraestructuras y usos, lo que ha hecho que el valor de esta franja se haya incrementado significativamente. La combinación de un mayor valor y la intensidad creciente de los procesos costeros, ha determinado que el valor de la cuantía de los daños asociados a los procesos costeros se hayan incrementado durante las últimas décadas (Kron, 2013). En la costa catalana, Jiménez et al. (2012) han caracterizado el aumento de daños asociados a procesos costeros, que asocian a un incremento en los valores en riesgo junto a la influencia de la erosión costera que ha disminuido la capacidad de protección que ofrecen las playas (Figura 1).

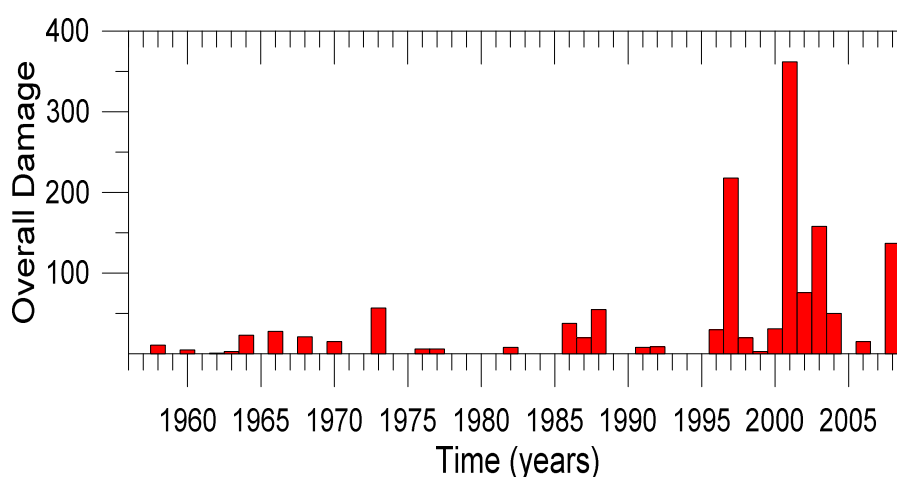


Figura 1. Evolución de daños en la costa catalana (Jiménez et al. 2012). Los daños se miden con un indicador cualitativo que crece al aumentar la magnitud de estos.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, es fácil entender que los métodos para prever y valorar los posibles daños de la zona costera se han convertido en una herramienta básica para la administración y gestión del litoral en todo el mundo. La demanda de métodos eficaces ha incrementado debido a la creciente preocupación por el estado de las zonas litorales (Ramieri et al., 2011). Ser conscientes de los

posibles daños y saber cómo responde la costa frente a situaciones extremas -como las tormentas- es importante, no sólo a nivel medioambiental o económico, sino también a nivel social. Gran parte de la población de todo el mundo vive en la costa y en consecuencia las viviendas, los barcos o las diferentes instalaciones de los habitantes de la zona pueden estar en peligro (USGCRP, 2013). Una de las aproximaciones más habituales es a través del análisis de la vulnerabilidad costera, que puede ser definido de forma simple como el potencial del sistema costero a ser dañado por un determinado proceso.

1.2 Objetivo

En este contexto, el objetivo de este trabajo es adaptar el método Smartline para evaluar la vulnerabilidad costera (Sharples, 2006) a las especificidades de la costa catalana. El objetivo práctico es valorar su viabilidad para identificar zonas susceptibles a ser afectadas por los procesos costeros y su potencial utilidad para permitir a los gestores identificar zonas críticas en el litoral. La zona de aplicación del método es la costa del Maresme y la Costa Brava, escogidas para representar adecuadamente la variabilidad geomorfológica de nuestras costas.

1.3 Estructura

Este documento se estructura de la siguiente forma: (i) en el capítulo 2 se introducen algunos aspectos generales de la vulnerabilidad costera y los aspectos básicos del método Smartline, (ii) en el capítulo 3 se describe la zona de estudio, los datos utilizados y la metodología de análisis; (iii) en el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos; (iv) en el capítulo 5 se discuten éstos y se presentan las principales conclusiones y, (v) en el capítulo 6 pueden verse las referencias que aparecen a lo largo del texto.

|

2. Vulnerabilidad Costera

2.1 Introducción

Podemos definir el término vulnerabilidad como función del grado de exposición al impacto de un proceso específico y de la capacidad del sistema a recuperarse o adaptarse al daño generado (Adger et al., 2004).

Así, en este contexto, una definición simple de vulnerabilidad costera sería el potencial de un sistema costero (la costa y sus componentes) a ser dañado por un proceso costero dado o un conjunto de ellos (e.g. Gouldsby y Samuels, 2005).

2.2 Métodos de análisis

La valoración y el estudio de los cambios producidos en las zonas costeras son clave para conservar el litoral a nivel mundial y supone un gran reto no sólo debido a la gran variabilidad de los procesos naturales a lo largo del tiempo, sino porque también hay que tener en cuenta aspectos sociales, económicos y administrativos bastante complejos, ya que, por ejemplo, la desaparición de las playas -no siempre se invierte el capital para soluciones a largo plazo debido a la escasez de recursos- puede afectar a la economía de la zona por un descenso de turismo.

En relación a los criterios para evaluar los diferentes métodos de valoración de la vulnerabilidad costera, enumeraremos unos requisitos que se consideran necesarios según Ramieri et al. (2011) para profundizar en lo que a día de hoy se busca o se necesita para analizar y gestionar las zonas costeras, es decir, para que pudiera ser útil en los procesos de gestión del territorio:

1. El método debe de ser aplicable tanto a escala regional como continental, teniendo la posibilidad de integrar información relevante de diferentes países.
2. Tener una resolución espacial mínima, teniendo como referencia lo estipulado en el modelo *DIVA -Dynamic Interactive Vulnerability Assesment model-*, un segmento de 70km de playa (Athanasios, T., 2008).
3. Posibilidad de tener en cuenta diferentes escenarios temporales.
4. Posibilidad de diferenciar entre las tipologías de sistemas costeros.

5. Incluir la valoración de uno o más impactos clave del cambio climático.
6. Posibilidad de valorar los riesgos económicos, sociales y ecológicos que el cambio climático supone para el litoral.
7. Considerar medidas de adaptación, tanto las que ya se han implementado como posibles medidas que puedan cambiar la futura vulnerabilidad de la zona.
8. Posibilidad de variar los escenarios escogidos o las asunciones hechas.
9. Consideración de cambios climáticos a nivel regional.
10. Valoración de incertidumbres, como por ejemplo, cambios en el panorama medioambiental o socio-económico.
11. Hacer accesibles los modelos empleados o los datos e información subyacente.

Se trata de encontrar un método completo y hallar el punto de equilibrio entre complejidad y simplicidad.

Tres de los métodos más comúnmente usados para la valoración de vulnerabilidad costera frente al calentamiento global son: los métodos basados en índices, los métodos basados en indicadores (generalmente también con soporte SIG) y los métodos basados en los sistemas de información geográfica como herramienta de soporte (Ramieri et al, 2011).

Los enfoques basados en índices expresan la vulnerabilidad costera mediante un índice de riesgo/vulnerabilidad unidimensional (a veces adimensional) y estas aproximaciones no son inmediatamente transparentes ya que el índice obtenido no proporciona información sobre las hipótesis o las asunciones hechas para llegar al final. Para poder aclarar el resultado es necesaria una explicación de la metodología adoptada que lo respalde (Ramieri et al, 2011).

Por otro lado, los métodos basados en indicadores expresan la vulnerabilidad de la costa mediante un conjunto de indicadores, elementos independientes, que caracterizan los procesos a los que la costa se puede ver sometida (presiones, impactos, exposición, riesgo, respuestas...). Este enfoque permite la evaluación de diferentes impactos sin necesidad de un contexto (Ramieri et al, 2011).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han sido y son una herramienta muy útil que abre un abanico lleno de posibilidades para hacer frente al estudio y la valoración de las zonas costeras de todo el planeta. La posibilidad de generar mapas en los que poder asignar atributos ha permitido desarrollar nuevos métodos de análisis rápidos y eficientes.

2.3. Métodos de evaluación de la vulnerabilidad

Uno de los métodos más utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad costera, especialmente frente a la subida del nivel del mar, es el *Coastal Vulnerability Index* (CVI) (Martí, 2012). Se trata de un método basado en el cálculo, para cada unidad en la que se divide la zona de estudio, de un índice de vulnerabilidad a partir de la combinación de las puntuaciones asignadas a diferentes variables. En base a los resultados de los cálculos, la costa se divide en distintas categorías de vulnerabilidad: baja, moderada, alta y muy alta. De esta forma se pueden identificar las zonas de estudio según su vulnerabilidad (Martí, 2012).

Özyurt (2007) y Özyurt et al. (2008) desarrollaron un CVI específico para valorar los daños causados por el aumento del nivel del mar. El índice se determina a partir de la integración de 5 subíndices (cada uno correspondiente a un impacto específico del aumento del nivel del mar). El autor aplicó el método en Turquía, en el Delta Göksu, donde consideró que los 5 impactos debidos al aumento del nivel del mar eran: erosión, inundación debido a tormentas, inundación permanente, intrusión de sal en recursos de agua subterránea e intrusión de agua salada en ríos. Cada subíndice se determina mediante una valoración cuantitativa de parámetros de influencia humana y parámetros físicos. Un valor entre el 1 y el 5 se asigna a cada parámetro teniendo en cuenta su contribución a la vulnerabilidad del sistema y se calculan los correspondientes subíndices. Una vez se tienen los distintos subíndices, se integran para incluirlos en un índice general, el CVI (SLR).

Martí (2012) propone un Índice específico para la costa catalana, el CatVI (*Catalan Vulnerability Index*). El método que la autora propone es también adaptable a otras zonas literales teniendo en cuenta las hipótesis específicas para la geomorfología y litoral consideradas. Martí (2012) cuantifica la vulnerabilidad mediante la diferencia entre el impacto producido por los procesos que actúan el litoral y la capacidad de adaptación del sistema. Para ello, se suponen que los diferentes procesos que actúan en la costa catalana pueden ser aislados y estudiados de forma independiente, para luego poder ser combinados a fin de obtener la vulnerabilidad global de la zona.

En el estudio (Martí, 2012) se consideran los siguientes procesos que afectan a la costa catalana:

- Erosión a medio plazo por gradientes en el transporte longitudinal de sedimentos
- Erosión a largo plazo por la subida relativa del nivel del mar

- Inundación a largo plazo por la subida relativa del nivel del mar
- Erosión a corto plazo causada por temporales
- Inundación a corto plazo causada por temporales

Para cada proceso se definen uno o más indicadores de vulnerabilidad, o variables intermedias, que reproducen de forma simplificada el proceso que se analiza. A cada uno de estos indicadores se le asocia una ley de vulnerabilidad con variación lineal que permite obtener un índice de vulnerabilidad parcial, el cual cuantifica el potencial de un tramo de costa a ser dañado por el proceso litoral considerado. El rango de variación del índice de vulnerabilidad parcial está entre 1,0 y 5,0 y se divide en cinco clases equidistantes: vulnerabilidad muy baja (de 1,0 a 1,7), vulnerabilidad baja (de 1,8 a 2,5), vulnerabilidad moderada (de 2,6 a 3,3), vulnerabilidad alta (de 3,4 a 4,1) y vulnerabilidad muy alta (de 4,2 a 5,0). A continuación, mediante fórmulas de agregación de los diversos índices de vulnerabilidad parcial, se definen indicadores de vulnerabilidad global con el fin de reflejar la interacción de los diferentes procesos de la zona costera. La vulnerabilidad global obtenida a partir de los indicadores se presenta de forma cualitativa (mediante rangos) o de forma cuantitativa (desarrollando leyes de vulnerabilidad global).

2.4 Método Smartline

Desde el punto de vista práctico, la evaluación de la vulnerabilidad en este trabajo se hará utilizando una aproximación basada en el método *smartline*. El método *smartline* utiliza SIG como herramienta base, para el manejo y tratamiento de la información a utilizar a la hora de calcular la vulnerabilidad. Así, se compila la información necesaria o requerida para el propósito perseguido en una línea segmentada (que representa la línea de costa a analizar) a la que se le asignan diferentes atributos a cada segmento. A estos segmentos no sólo se le atribuyen características geomorfológicas que coinciden con el terreno sino que también se le pueden asignar, de manera sencilla, otras características o procesos relacionados con cada lugar no necesariamente coincidentes en espacio.

La ventaja de este método reside en la gran cantidad de información que se puede almacenar en cada segmento de línea y como la combinación de dicha información puede dar respuesta a distintas preguntas.

El método original propuesto por Sharples (2006) consiste en representar una clasificación geomorfológica de las diferentes partes de las playas, incluyendo el interior del territorio, en una simple línea, de manera que a través de diferentes pasos y combinaciones entre los diferentes atributos se pueda llegar al objetivo deseado. Se trata de un método muy rápido y fácil de entender ya que es sumamente visible e intuitivo.

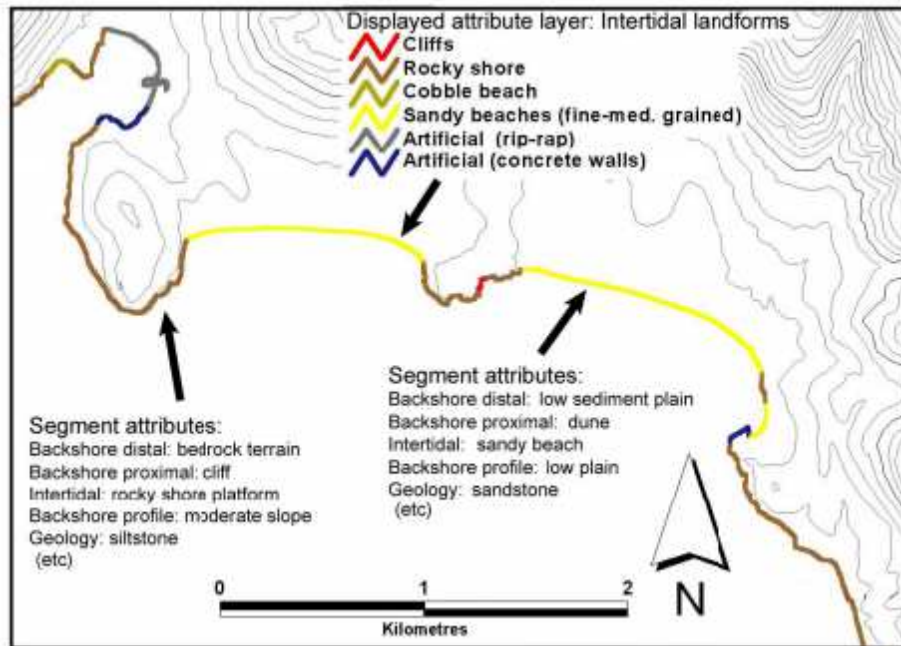


Figura 2: Ejemplo de un mapa smartline utilizado para asignar atributos de accidentes geográficos costeros.

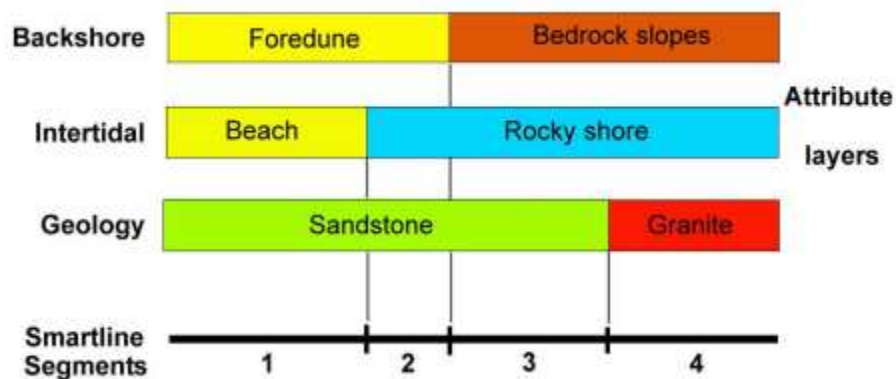


Figura 3: Diagrama ilustrativo de un ejemplo de segmentación *smartline*: la línea *smartline* (*smartline segments*) se segmenta siempre que uno de los atributos cambie.

2.5 Evaluación de la vulnerabilidad

Si bien el método de cálculo y manejo de la información es importante, lo más importante es cómo y bajo qué criterios se evaluará la información. En este contexto, eso equivale a especificar cómo evaluaremos la vulnerabilidad de la costa catalana. Teniendo en cuenta trabajos existentes acerca de los problemas costeros en Cataluña (Jiménez et al. 2012, Bosom y Jiménez, 2011; Guillén, 2008), en este trabajo se han considerado los siguientes procesos como los más relevantes a la hora de evaluar la vulnerabilidad: erosión permanente por aumento del nivel del mar, erosión debida a la dinámica litoral a medio plazo, erosión debida al impacto de temporales, inundación permanente por aumento del nivel del mar y inundación provocada por el oleaje de los temporales.

Para la caracterización de la vulnerabilidad frente al aumento del nivel del mar se ha estimado el retroceso esperable (erosión inducida) de la línea de orilla, el cual se ha calculado haciendo uso del modelo de comportamiento propuesto por la ley de Bruun:

$$R_{\infty} = S \cdot \frac{L_*}{h_* + B}$$

Donde R_{∞} es el retroceso horizontal de la playa, S es el incremento del nivel del mar verticalmente (0.6 m para 2100 según IPCC (2007)) y, finalmente, $\frac{L_*}{h_* + B}$ es la inversa de la pendiente de la línea de costa. La pendiente de cada playa se ha obtenido a partir de un mapa que proporciona la *Generalitat de Catalunya* en su web de las curvas de batimetría del litoral catalán, a partir del cual se han hecho una serie de mediciones mediante una herramienta SIG.

A partir de la variación de la pendiente a lo largo de la costa catalana hemos podido calcular la erosión inducida por el aumento del nivel del mar para diferentes tramos homogéneos.

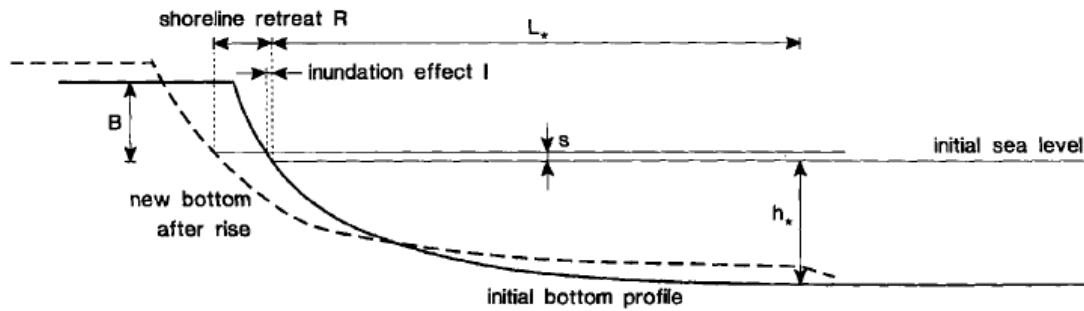


Figura 4: Esquema de las variables en la Ley de Bruun

Para caracterizar el comportamiento a medio plazo, se ha utilizado los desplazamientos de la línea de orilla experimentados por la costa catalana en una escala de décadas y, que en principio, son debidos a gradientes en las tasas de transporte a lo largo de la costa tanto de origen natural como humano (e.g. aguas abajo de estructuras costeras). Estas tasas de evolución para cada playa han sido obtenidas de un estudio realizado para caracterizar el estado dinámica de la costa catalana (Llibre Verd, CIIRC 2010).

En cuanto al aumento vertical del nivel del mar se tendrá en cuenta al considerar los distintos saltos temporales para caracterizar la vulnerabilidad frente a inundación.

Para valorar el daño producido por lo temporales y así poder caracterizar su vulnerabilidad, primero hemos utilizado los datos proporcionados por Bosom y Jiménez (2011). El objetivo de su estudio es calcular la vulnerabilidad asociada a una tormenta con un periodo de retorno dado. Para conseguir los efectos de las tormentas que afectan a la costa, en este caso la inundación y el volumen de playa erosionado inducido por el temporal, se seleccionaron indicadores incluyendo las propiedades de la tormenta y características de la playa. Las inundaciones son debidas generalmente a dos fenómenos, el aumento del nivel del mar y la acción de las olas, sin embargo en este estudio solo se considera la acción de las olas para el cálculo considerando que el aumento del nivel del mar en Cataluña es mucho menor que la aportación de las olas al remonte. En cuanto a la erosión, el volumen erosionado por la tormenta, se utilizó el modelo propuesto por Mendoza y Jiménez (2006) para estimar un orden de magnitud de la erosión esperada. Para relacionar cada dato obtenido de remonte e inundación con las playas de Cataluña se propone una clasificación en 6 tipos de playa según su diámetro y la pendiente de la playa.

En el presente trabajo hemos clasificado las 204 playas según el diámetro medio de sedimento y escogido un período de retorno de 50 años (tormenta con probabilidad de ocurrencia de un 2%) para poder hacer un análisis de la vulnerabilidad de la costa catalana a día de hoy, en 10 años, en 25 años y en 50 años.

Los atributos correspondientes a los temporales serán nuestros valores de referencia (W_{ref}), es decir, tomaremos el ancho de playa que desaparece debido al temporal, añadiéndole 5 metros de seguridad, y lo compararemos con el ancho de playa actual según el Llibre Verd (2010), de este modo obtenemos un ancho de playa horizontal normalizado:

$$IV = \frac{W_t}{W_{ref}}$$

Nótese que, al escoger como valor de referencia el ancho de playa que una tormenta es capaz de engullir, estamos considerando que la capacidad de adaptación de la playa depende de si su ancho es mayor o menor que el de referencia, es decir, si la tormenta es capaz de llevarse el volumen de arena equivalente al ancho de playa. Es por ello que el criterio para evaluar la vulnerabilidad de la costa catalana frente a la erosión horizontal es el siguiente:

$0 \geq IV$: La playa desaparecerá: Vulnerabilidad Muy Alta

$1 \geq IV > 0$: La playa tendrá un ancho menor que el de referencia: Vulnerabilidad Alta

$2 \geq IV \geq 1$: La playa tendrá un ancho mayor que el ancho de referencia: Vulnerabilidad Media

$IV > 2$: La playa tendrá un ancho bastante mayor que el ancho de referencia: Vulnerabilidad Baja

Esta aproximación no implica que la playa no se recupere a posteriori, sino lo que indica es que momentáneamente tendría una configuración de riesgo. En este caso, es implícito el considerar la playa como una estructura de protección que daría

protección al *hinterland*. Así, si la playa desapareciera significaría que las olas serían capaces de actuar sobre lo que haya tras ella (infraestructuras o cualquier elemento) y, a medida que el ancho de playa existente sea mayor que el de la tormenta, lo que indicaría es que lo de detrás estaría más protegido y, en consecuencia la vulnerabilidad de la costa iría disminuyendo.

Para inundaciones producidas por temporal, en este caso inundaciones provocadas por el oleaje, se ha escogido el valor de inundación o remonte (Ru) debido a temporales como valor de referencia para así poder ver la vulnerabilidad de la costa catalana frente a inundaciones por temporales:

$$IV = \frac{B}{Ru}$$

Donde B es la altura de Berma indicada de nuevo en El Llibre Verd (2010).

El criterio seguido para evaluar la vulnerabilidad frente a inundaciones se asemeja al anterior:

$0 \geq IV$: La playa se inunda pudiendo afectar más allá de la arena: Vulnerabilidad Muy Alta

$1 \geq IV > 0$: La playa se inundará: Vulnerabilidad Alta

$2 \geq IV \geq 1$: La playa no llegará a inundarse: Vulnerabilidad Media

$IV > 2$: La playa tendrá bastante margen antes de inundarse: Vulnerabilidad Baja

3. Área de Estudio, datos y metodología.

3.1. Área de estudio

Las zonas costeras cuentan con recursos y sistemas naturales únicos que hacen de ellas lugares atractivos y productivos. Estas regiones concentran gran parte de la población, mucha actividad económica sobre poca superficie y están en continua evolución y cambio. El litoral catalán, al noreste de España, es un claro ejemplo de costa en la que las personas han desestabilizado y modificado a gran escala el ambiente costero mediante cambios en el uso del suelo, construcciones masivas y la sobreexplotación de recursos.

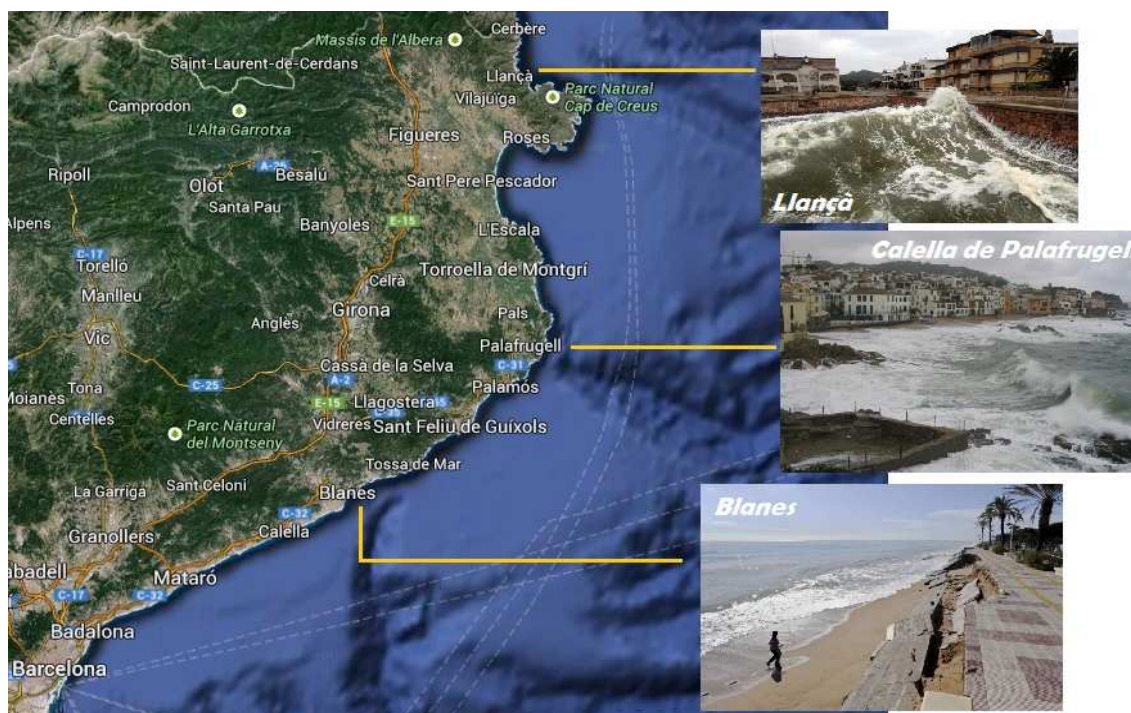


Figura 5: Mapa de Cataluña, Costa Brava y costa del Maresme. Las fotografías de la derecha muestran zonas perjudicadas por eventos extremos.

En Cataluña, más del cincuenta por ciento de la población vive en el litoral y dicha población aumenta en ciertas épocas debido al turismo donde el sol y el buen tiempo son los protagonistas. La región de Cataluña es uno de los lugares más ricos de España, sus 699 km de costa, de los cuales 270 km son playas, incluyen una gran variedad de sistemas costeros que hacen posible una diversidad biológica y

geomorfológica en el litoral. El clima mediterráneo ha ayudado a que las personas configuraran una estructura de la región dominada por actividades costeras tales como el turismo, la agricultura y la construcción residencial. Actividades industriales y comerciales están íntimamente ligadas a estas zonas, especialmente en Tarragona y Barcelona, pero otras actividades económicas, especialmente el turismo, son claramente dominantes. Es por ello que Cataluña es un destino turístico de primer orden y sus playas son uno de los mayores atractivos.

Atendiendo a la morfología i a la dinámica sedimentaria del litoral catalán se pueden definir dos tipos de costas: la sedimentaria y la abrupta (Guillén, 2008).

La costa sedimentaria se caracteriza por pendientes suaves o moderadas. Este tipo de costas están afectadas por diversos grados de urbanización y presentan una vulnerabilidad habitualmente elevada frente a fenómenos de erosión e inundación.

La costa abrupta está constituida por un paisaje rocoso que genera fuertes pendientes. Los riesgos asociados a la erosión e inundación son bajos, aún así, pequeños tramos sedimentarios (calas) se pueden intercalar en este tipo de costa, con características mixtas entre costa abrupta y costa sedimentaria.

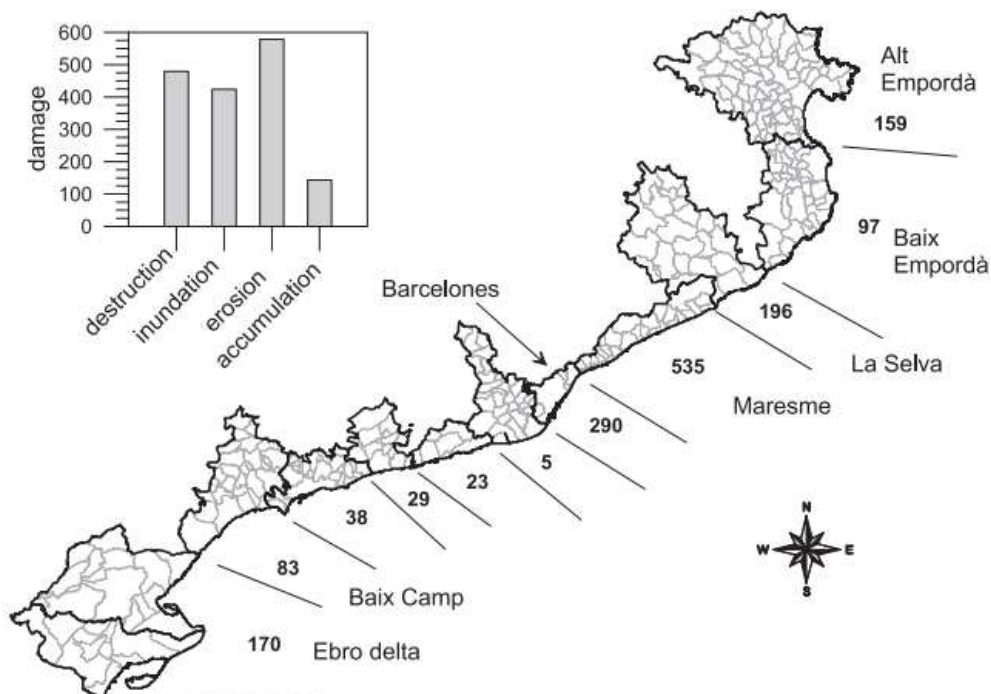


Figura 6: Mapa de las comarcas de la costa catalana. Los números representan valores correspondientes al daño producido en la zona (Jiménez et al., 2012). El gráfico de barras representa la contribución de cada daño al valor global.

De todo el litoral catalán, en este trabajo se aplicará la metodología presentada en 2 tramos que han sido seleccionados en base a los procesos e impactos a los que se ven sometidos, y en base a su diferente geomorfología representativa de la mayor parte de tipos de costa presentes en Cataluña. Estos tramos son en consecuencia un buen caso test para la aplicabilidad del método a nuestro litoral. Así, las zonas escogidas como caso de estudio son la Costa Brava y el Maresme Nord (Figura 6). La costa del Maresme corresponde a la comarca del Maresme, provincia de Barcelona, y la Costa Brava limita con la costa del Maresme, en la desembocadura del río La Tordera en Blanes, y acaba en la frontera con Francia en Portbou. Estas zonas se han visto afectadas en los últimos años por el impacto de episodios de grandes temporales que, en algunos casos, han hecho desaparecer las playas y han afectado a las infraestructuras existentes.

3.2 Datos

Se ha utilizado Google Maps y la vista aérea que proporciona mediante satélites para la clasificación de la playa en zona activa (sedimentaria) y la zona no activa (acantilados, rocas, construcciones...). Esta herramienta también nos ha servido para saber qué había detrás de cada zona activa a una distancia de 100 metros y así discriminar si se trata de zona natural o modificada por el humano.

Los demás atributos que se asignan posteriormente a los diferentes segmentos se han obtenido principalmente de tres fuentes distintas:

1. El Llibre Verd (2010) proporcionado por el CIIRC (Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners) caracteriza el estado y la evolución de la zona costera de Cataluña y sirve de referencia para la planificación y la gestión costera. Este libro nos aporta datos derivado de un estudio exhaustivo de las playas pertenecientes a cada una de las provincias catalanas con litoral: Barcelona, Lleida y Girona. Este estudio empieza con una zonificación de cada provincia seguida de mediciones y análisis que engloban las medidas de los sedimentos de casa playa, la anchura de playa, la longitud de la playa y otros parámetros descriptivos generales junto a características morfodinámicas e hidrodinámicas. Los datos de la evolución de la línea media de costa se calcularon en condiciones evolutivas actuales. El período seleccionado para el cálculo corresponde a una situación en la cual la mayor parte de las obras costeras a lo largo del litoral catalán ya estaban construidas (e incluso ya se

habían llevado a cabo grandes operaciones de alimentación de playas) y, por lo tanto, la evolución obtenida representa el efecto de la dinámica litoral una vez afectadas por las obras. En este trabajo se ha tenido acceso a los datos de un total de 204 playas, 100 pertenecientes a la zona del Maresme y 104 a la costa Brava.

2. El valor del aumento del nivel del mar que hemos utilizado es de 0,6 metros en 100 años (IPCC, 2013).
3. Bosom y Jiménez (2011) aportan los datos relacionados con los temporales y sus consecuencias, la erosión y la inundación de las playas.

3.3. Metodología

Las tres etapas que se han seguido para estudiar la vulnerabilidad con el método *smartline* son las siguientes:

1. **Borde.** Se ha dividido la línea de la costa catalana en tres tipos de segmentos según su naturaleza para separar zonas activas y no activas (naturales o antropogénicas). De esta manera localizamos las zonas sedimentarias que nos interesan estudiar, permitiéndonos apreciar el efecto de la acción humana en las zonas activas.
2. **Interior del territorio (*Hinterland*).** Desde el final de la costa se ha considerado un espacio de 100 metros para saber si la playa tenía espacio de acomodación o no, y en caso negativo, saber si era por presencia humana o por motivos naturales. De este modo se pueden identificar las playas más susceptibles a desaparecer (aquellas que no tienen lugar para la adaptación) y las que tienen espacio para recolocarse.
3. **Procesos Dinámicos.** En este paso se hace una valoración mucho más específica de cómo cada zona activa es sometida a temporales, erosión, aumento del nivel del mar y como puede ser afectada según su ancho medio o su grado de exposición a temporales. Gracias a todas las variables disponibles se ha podido trabajar con una hoja de cálculo donde, de forma detallada, se ha creado un modelo de comportamiento con el que establecer diferentes grados de vulnerabilidad.

A continuación se presentará la metodología empleada mediante una explicación generalizada. Al final de esta explicación hay un ejemplo de la zona de Roses, en la Costa Brava, que muestra detalladamente todos los pasos seguidos para llegar al resultado final.

Primeramente recopilamos todos los datos de las dos primeras etapas, Borde e Interior del Territorio, con la ayuda de Google Maps. Seguidamente, dividimos la línea de costa en los diferentes segmentos para poder atribuirle a cada uno sus propiedades geomorfológicas y su evolución según Llibre Verd (2010).

Para calcular la erosión causada por el aumento del nivel del mar utilizamos la ley de Bruun y, una vez hemos conseguido los datos básicos para cada tramo, clasificamos las playas por su diámetro de grano medio según Bosom y Jiménez (2011) para así poder asignar a cada una de las 204 playas clasificadas por el Llibre Verd (2010) un valor de erosión horizontal y otro de remonte debido a una tormenta, en este caso, con un periodo de retorno de 50 años.

Una vez conseguidos todos los atributos, pasamos a la hoja de cálculo dónde haremos la evaluación de la vulnerabilidad de la costa catalana (ver apartado 2.5.).

Con el fin de poder valorar los impactos en el presente y en el futuro, se ha evaluado cada tramo frente a vulnerabilidad para hoy y para dentro de 10, 25 y 50 años. En el caso de vulnerabilidad frente a erosión se ha decidido hacer dos aproximaciones, una sin tener en cuenta el ascenso del nivel del mar y otra añadiendo su impacto para así poder comparar resultados.

3.4. Ejemplo

Tomaremos como ejemplo las playas de la Costa Brava situadas en Roses, que corresponden a las playas número 70, 71, 72, 73 y 74 de la Figura 7.

Mediante Google Maps podemos asignar los atributos de las etapas 1 y 2 a cada segmento, de manera que diferenciamos los segmentos según su naturaleza y según lo que encontremos detrás de la playa a una distancia de 100 metros. Después de haber completado la Etapa 1 y 2 pasamos a la 3. Para ello utilizaremos los datos disponibles en el Llibre Verd (2010) y completaremos la tabla de atributos con los datos necesarios (Ver Tabla 1):



Figura 7: Mapa de la Zona de Roses en la Costa

Nombre Playa	Código	Borde	Hinterland	W (m)	Grado Exposición	Evol. (m/a)	Berma (m)
Playa Santa Margarida	AERO070	Activo	No ANTROP.	42	Expuesta	-0,97	0,1
Playa de Salatar	AERO071	Activo	No ANTROP.	29	Expuesta	-0,99	0,9
Playa del Rastrell	AERO072	Activo	No ANTROP.	37	Semiexpuesta	-0,44	0,9
Playa Nova	AERO073	Activo	No ANTROP.	26	Protegida	-0,47	0,5
Playa de la punta	AERO074	Activo	No ANTROP.	57	Protegida	-2,63	0,7

Tabla 1: Atributos correspondientes a las playas de la zona de Roses.

También podemos, a partir del d_{50} de cada zona, clasificar la playa según Bosom y Jiménez (2013), escogiendo los datos correspondientes a una tormenta con un periodo de retorno de 50 años. En el caso de Roses todas las playas son de tipo 1. Los datos que le corresponden a cada una se pueden ver en la Tabla 2, son todos idénticos ya que dependen del tipo de playa.

A continuación calculamos la pendiente del borde de la costa mediante una imagen proporcionada por la web de la Generalitat de Catalunya. En el caso de Roses el valor de la pendiente es 0.023 y 0.029 metros. Aplicando la ley de Bruun tomando $S=0,6$ m cada cien años, obtenemos los siguientes retrocesos:

$$R_{100a} = S \cdot \frac{L_*}{h_* + B} = 0,6 \cdot \frac{1}{0,023} = 26 \text{ m}$$

$$R_{100a} = S \cdot \frac{L_*}{h_* + B} = 0,6 \cdot \frac{1}{0,029} = 21 \text{ m}$$

Nombre Playa	SLR (m/a)	D50	Zona	Tipo	IncrementoV(m ³ /m)	Ru(m)
Playa Santa Margarida	0,21	0,3	1	1	188,79	4,08
Playa de Salatar	0,21	0,3	1	1	188,79	4,08
Playa del Rastrell	0,26	0,3	1	1	188,79	4,08
Playa Nova	0,26	0,3	1	1	188,79	4,08
Playa de la punta	0,26	0,2	1	1	188,79	4,08

Tabla 2: Atributos correspondientes a las playas de la zona de Roses.

Una vez recopilados todos los datos podemos empezar con los cálculos. El primer paso es calcular nuestro W_{crit} o W_{ref} con el retroceso de la playa debido a una tormenta extrema con período de retorno de 50 años. En la siguiente ecuación, ΔV representa el volumen de playa reducido por la tormenta y B la altura de berma, ambos valores obtenidos anteriormente. A continuación se presenta el cálculo para la Playa de Salatar (71):

$$R_{tormenta} = \frac{\Delta V}{B + 3} = \frac{188,79}{3,9} = 48,41 \text{ m}$$

Para la obtención de W_{crit} le sumaremos 5 metros de seguridad al $R_{tormenta}$ calculado.

$$W_{crit} = R_{tormenta} + 5 \text{ (m)}$$

Una vez calculado W_{crit} y demás atributos necesarios podemos normalizar el ancho de playa para día de hoy, para dentro de 10, 25 y 50 años, considerando y sin considerar el aumento del nivel del mar. A continuación se muestran los cálculos para cada caso de la Playa de Salatar:

► Vulnerabilidad frente a erosión hoy:

$$IV = \frac{W_{hoy}}{W_{crit}} = \frac{29}{48,41 + 5} = 0,54 \text{ (Vulnerabilidad Alta)}$$

► Vulnerabilidad frente a erosión en 10 años:

$$IV = \frac{W_{hoy} + Evol_{10a}}{W_{crit}} = \frac{29 - 0,99 \cdot 10}{48,41 + 5} = 0,36 \text{ (Vulnerabilidad Alta)}$$

► Vulnerabilidad de la playa en 25 años:

$$IV = \frac{W_{hoy} + Evol_{25a}}{W_{crit}} = \frac{29 - 0,99 \cdot 25}{48,41 + 5} = 0,079 \text{ (Vulnerabilidad Alta)}$$

- Vulnerabilidad frente a erosión en 50 años:

$$IV = \frac{W_{hoy} + Evol_{50a}}{W_{crit}} = \frac{29 - 0,99 \cdot 50}{48,41 + 5} = -0,38 \text{ (Vulnerabilidad Muy Alta)}$$

- Vulnerabilidad frente a erosión en 10 años con aumento del nivel del mar:

$$IV = \frac{W_{hoy} + Evol_{10a} - SLR_{10a}}{W_{crit}} = \frac{29 - 0,99 \cdot 10 - 0,21 \cdot 10}{48,41 + 5} = 0,32$$

(Vulnerabilidad Alta)

- Vulnerabilidad frente a erosión en 25 años con aumento del nivel del mar:

$$IV = \frac{W_{hoy} + Evol_{25a} - SLR_{25a}}{W_{crit}} = \frac{29 - 0,99 \cdot 25 - 0,21 \cdot 25}{48,41 + 5} = -0,019$$

(Vulnerabilidad Muy Alta)

- Vulnerabilidad frente a erosión en 50 años con aumento del nivel del mar:

$$IV = \frac{W_{hoy} + Evol_{50a} - SLR_{50a}}{W_{crit}} = \frac{29 - 0,99 \cdot 50 - 0,21 \cdot 50}{48,41 + 5} = -0,58$$

(Vulnerabilidad Muy Alta)

La Tabla 3 contiene los resultados de todas las playas analizadas. A continuación se calcula la vulnerabilidad de la playa frente a inundaciones. El Valor de referencia o Ru_{crit} es la inundación que se produce durante una tormenta. Este valor de referencia es posteriormente comparado con la capacidad de la playa de soportar está subida del nivel del mar, o lo que es lo mismo, la altura de Berma.

Nombre Playa	Wcrit	Eros.HOY	Eros.10a	Eros.25a	Eros.50a	Eros.10aSLR	Eros.25aSLR	Eros.50aSLR
Playa Santa Margarida	65,9	0,637329	0,49014	0,269347	-0,09863	0,45827011	0,18968134	-0,25796662
Playa de Salatar	53,408	0,542993	0,35763	0,079577	-0,38384	0,31830621	-0,01872389	-0,58044073
Playa del Rastrell	53,408	0,692784	0,6104	0,486821	0,280858	0,56171684	0,36511594	0,03744779
Playa Nova	58,94	0,441127	0,36138	0,241771	0,042416	0,32575501	0,15269766	-0,13573125
Playa de la punta	56,024	1,017415	0,54798	-0,15618	-1,32978	0,50156785	-0,27220319	-1,5618216

Tabla 3: Datos y resultados del cálculo de vulnerabilidad frente a erosión de la zona de Roses.

Para seguir con la continuidad del ejemplo, escogemos de nuevo la Playa de Salatar para los cálculos:

- Vulnerabilidad frente a inundaciones hoy:

$$IV = \frac{B}{Ru} = \frac{0,9}{4,08} = 0,22 \text{ (Vulnerabilidad Alta)}$$

- Vulnerabilidad frente a inundaciones en 10 años:

$$IV = \frac{B - S_{10a}}{Ru} = \frac{0,9 - 0,06}{4,08} = 0,205 \text{ (Vulnerabilidad Alta)}$$

Recordemos que S es el incremento del nivel del mar verticalmente.

- Vulnerabilidad frente a inundaciones en 25 años:

$$IV = \frac{B - S_{25a}}{Ru} = \frac{0,9 - 0,6 \cdot 0,25}{4,08} = 0,18 \text{ (Vulnerabilidad Alta)}$$

- Vulnerabilidad frente a inundaciones en 50 años:

$$IV = \frac{B - S_{50a}}{Ru} = \frac{0,9 - 0,6 \cdot 0,5}{4,08} = 0,147 \text{ (Vulnerabilidad Alta)}$$

Los resultados se agrupan en la siguiente tabla:

Nombre Playa	Berma	RU(m)	In.HOY	In.10aSLR	In.25aSLR	In.50aSLR
Playa Santa Margarida	0,1	4,08	0,0245	0,009804	-0,01225	-0,04902
Playa de Salatar	0,9	4,08	0,2206	0,205882	0,183824	0,147059
Playa del Rastrell	0,9	4,08	0,2206	0,205882	0,183824	0,147059
Playa Nova	0,5	4,08	0,1225	0,107843	0,085784	0,04902
Playa de la punta	0,7	4,08	0,1716	0,156863	0,134804	0,098039

Tabla 4: Datos y resultados de los cálculos de vulnerabilidad frente a inundaciones de la zona de Roses.

Vulnerabilidad frente a Inundación				
Nombre Playa	In.HOY	In.10aSLR	In.25aSLR	In.50aSLR
Playa Santa Margarida	Alta	Alta	Muy Alta	Muy Alta
Playa de Salatar	Alta	Alta	Alta	Alta
Playa del Rastrell	Alta	Alta	Alta	Alta
Playa Nova	Alta	Alta	Alta	Alta
Playa de la punta	Alta	Alta	Alta	Alta

Tabla 5: Vulnerabilidad frente a inundación en Roses

Vulnerabilidad frente a Erosión							
Nombre Playa	Eros.HO	Eros.10a	Eros.25a	Eros.50a	Eros.10aSLR	Eros.25aSLR	Eros.50aSLR
Playa Santa Margarida	Alta	Alta	Alta	Muy Alta	Alta	Alta	Muy Alta
Playa de Salatar	Alta	Alta	Alta	Muy Alta	Alta	Muy Alta	Muy Alta
Playa del Rastrell	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Playa Nova	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta
Playa de la punta	Media	Alta	Muy Alta	Muy Alta	Alta	Muy Alta	Muy Alta

Tabla 6: Vulnerabilidad frente a erosión en Roses

4. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis de distintos segmentos de la costa catalana.

El orden de los resultados es el siguiente:

1. Los resultados del ejemplo anterior, zona de Roses. Las Figuras 8, 9 y 10 son el resultado de la vulnerabilidad de cada playa
2. La Costa Brava se presenta en dos partes para facilitar la visualización de los diferentes segmentos. El primer tramo va desde la frontera con Francia hasta l'Estartit y el segundo de l'Estartit hasta Blanes. Los mapas se analizaran siempre en el mismo orden:
 - a. Mapa de las Etapas 1 y 2 y una tercera línea que representa si el segmento se considera o no expuesto a los temporales por su orientación en el mapa.
 - b. Mapa cuyos segmentos representan la vulnerabilidad frente a erosión sin tener en cuenta el aumento del nivel del mar.
 - c. Mapa cuyos segmentos representan la vulnerabilidad frente a erosión teniendo en cuenta el aumento del nivel del mar.
 - d. Mapa cuyos segmentos representan la vulnerabilidad frente a inundaciones.

Las líneas de los mapas de vulnerabilidad están ordenadas cronológicamente, es decir, de derecha a izquierda o de arriba abajo se presentan los mapas desde la vulnerabilidad que presentan ahora hasta la vulnerabilidad que se estima que presenten en 50 años.

3. El Maresme, de Blanes a Montgat, se presenta en un único tramo siguiendo el mismo esquema que la Costa Brava.

4.1 Zona de Roses

En el ejemplo anterior hemos obtenido las diferentes vulnerabilidades de cada playa frente a erosión (Ver Tabla 6) y frente a inundación (Ver Tabla 5). Los resultados se ven reflejados de manera más visual en las Figuras 8, 9 y 10.

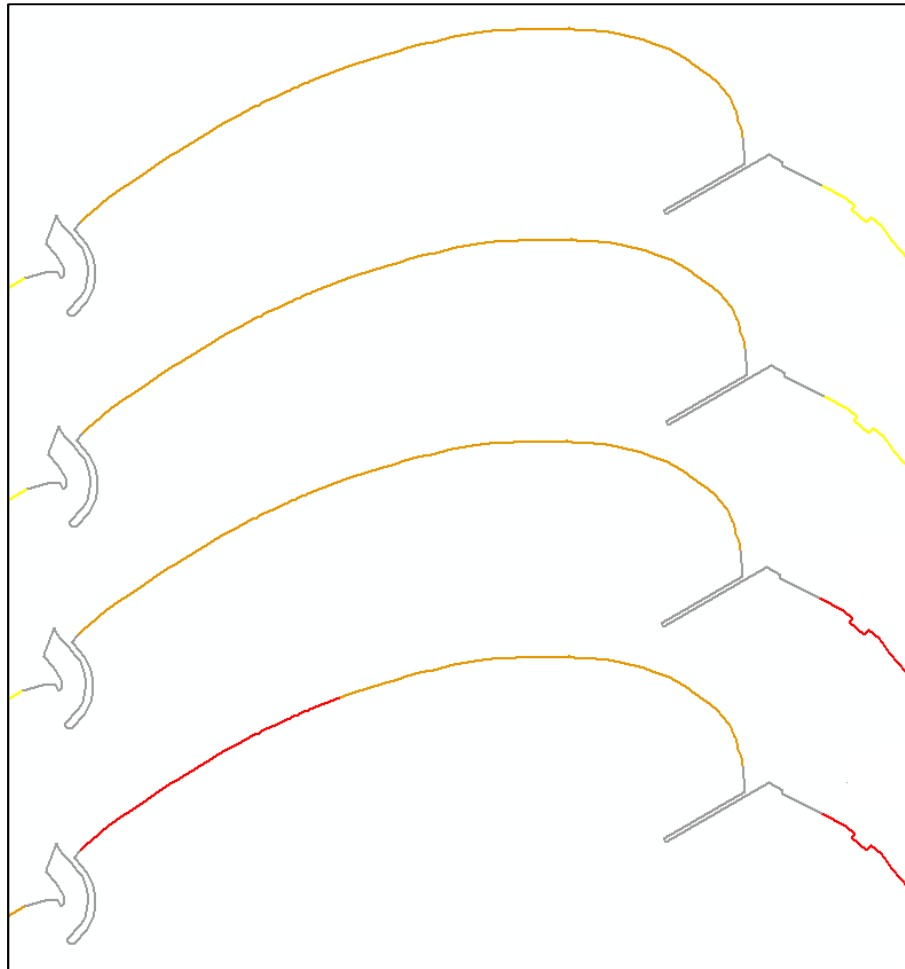


Figura 8: Líneas de costa Zona de Roses. Vulnerabilidad frente a erosión sin SLR

<i>Vulnerabilidad frente a erosión (sin SLR)</i>			
<i>De arriba abajo:</i>		<i>Leyenda Vulnerabilidad:</i>	
1. Vulnerabilidad actualmente		/ Baja	/ Alta
2. Vulnerabilidad en 10 años			
3. Vulnerabilidad en 25 años		/ Media	/ Muy Alta
4. Vulnerabilidad en 50 años			

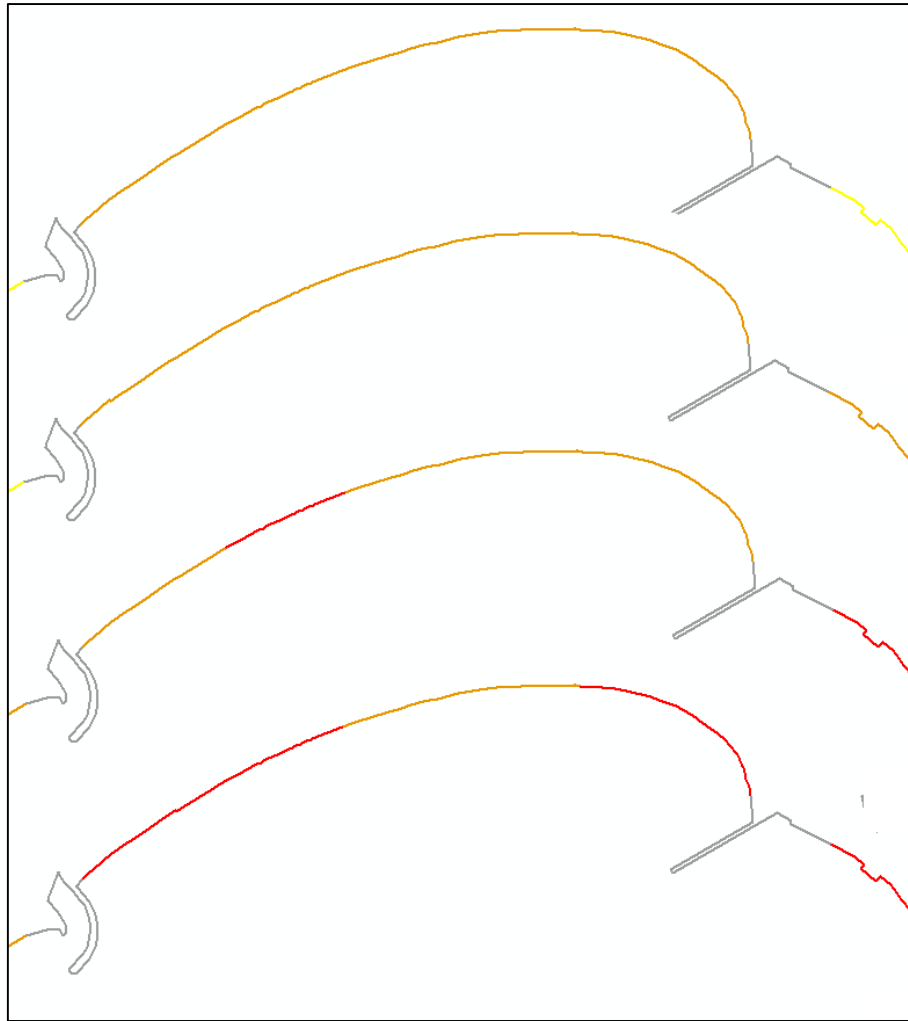




Figura 9: Líneas costa Zona de Roses. Vulnerabilidad frente a erosión con SLR

<i>Vulnerabilidad frente a erosión con SLR</i>			
<i>De arriba abajo:</i>		<i>Leyenda Vulnerabilidad:</i>	
1. Vulnerabilidad actualmente		 Baja	 Alta
2. Vulnerabilidad en 10 años			
3. Vulnerabilidad en 25 años		 Media	 Muy Alta
4. Vulnerabilidad en 50 años			

En la actualidad se trata de una zona con vulnerabilidad alta y por lo tanto, sería susceptible de verse afectada de forma significativa por el impacto de una tormenta cuyo período de retorno es de 50 años. En cualquier ocasión y, esto es válido para todos los casos, el que una zona sea vulnerable no implica necesariamente que algo vaya a ocurrir, sino que si ocurre (e.g. el impacto de la tormenta), la costa será susceptible a ser dañada.

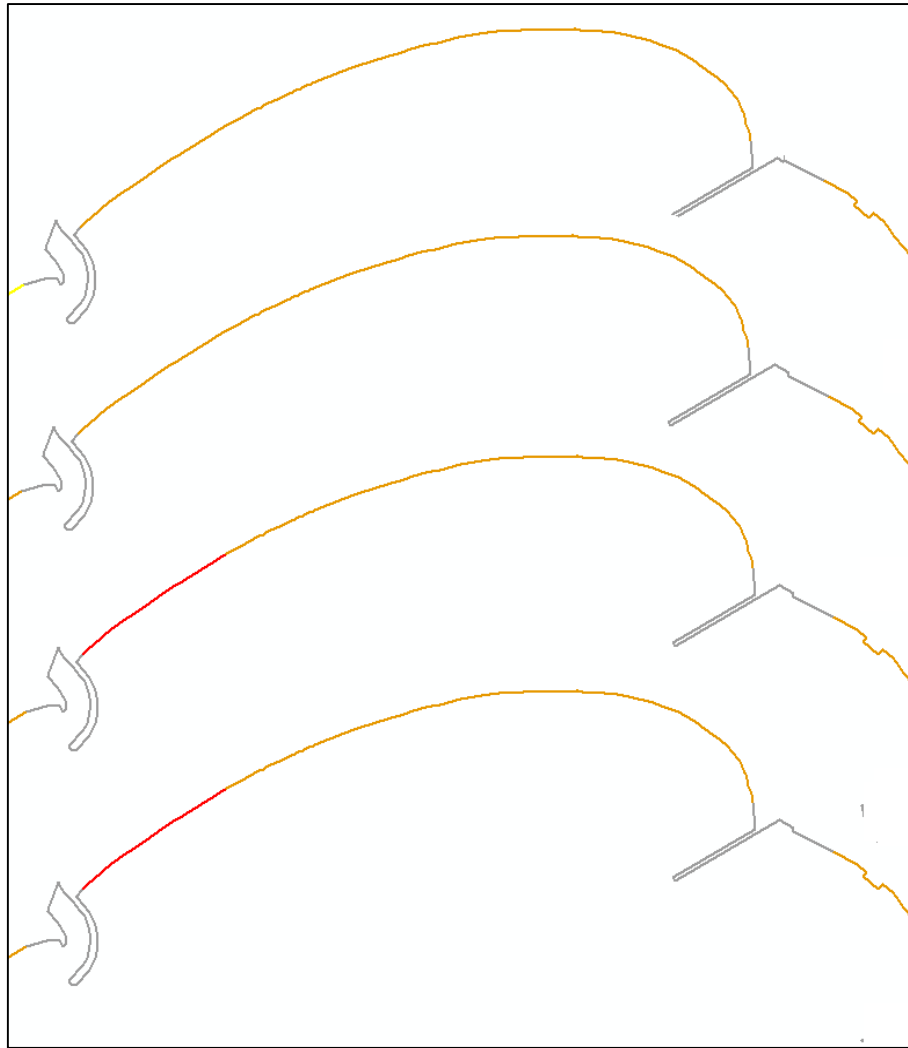


Figura 10: Líneas de costa zona de Roses. Vulnerabilidad frente a inundación

<i>Vulnerabilidad frente a inundación</i>			
<i>De arriba abajo:</i>		<i>Leyenda Vulnerabilidad:</i>	
1. Vulnerabilidad actualmente		 Baja	 Alta
2. Vulnerabilidad en 10 años			
3. Vulnerabilidad en 25 años		 Media	 Muy Alta
4. Vulnerabilidad en 50 años			

A medida que pasan los años se pueden ver las zonas más críticas, en este caso las playas 70, 71 y 74 (Ver Figura 7), las playas más cercanas a las infraestructuras. Frente a inundaciones nos encontraremos un panorama muy similar en toda la costa catalana al que nos encontramos en la zona de Roses. Resulta que todo el tramo adquiere vulnerabilidad Alta frente a inundaciones a día de hoy. Esto quiere decir que se trata de una zona muy vulnerable a inundaciones ya que la altura de berma no absorbería el posible remonte de una tormenta con un período de retorno de 50 años.

A medida que avanzamos en el tiempo vemos que la zona más cercana a la entrada de barcos es la más vulnerable. Esa zona requeriría especial atención puesto que en las dos ocasiones, frente a erosión y frente a inundación, es la más desfavorable a largo plazo.

4.2 Costa Brava (Tramo 1), de la frontera con Francia a l'Estartit

La Costa Brava siempre se ha caracterizado por ser la costa más rocosa de toda Cataluña. Gran parte de la frontera con el mar Mediterráneo es rocoso, ya sean acantilados o calas rocosas. Como puede verse en la Figura 11 la tipología costera dominante en la zona se corresponde con costas rocosas naturales (sobre todo acantilados) que dominan el paisaje de la Costa Brava y que determinan su carácter estático y su poca vulnerabilidad a los procesos estudiados. La acción humana también está presente en el territorio a través de la modificación del borde costero en algunas zonas que también se correspondería con zonas no activas (Figura 11) y, en el tramo en cuestión, también hay zonas sedimentarias no muy extensas (calas). Pero es el Golf de Roses que va desde Roses hasta l'Escala la mayor costa sedimentaria y, por lo tanto activa de todo el tramo. En dicho Golfo tenemos zonas con espacio de acomodación y zonas donde la evolución y recolocación de la playa se ve impedida por no tener espacio natural disponible (línea 2 Figura 11). También podemos ver como la gran mayoría de calas tampoco tienen espacio de acomodación por razones antrópicas. Dada la extensión y representatividad del Golf de Roses, así como que se trata de una zona directamente expuesta a temporales, será el área donde se centrará la evaluación de la vulnerabilidad.

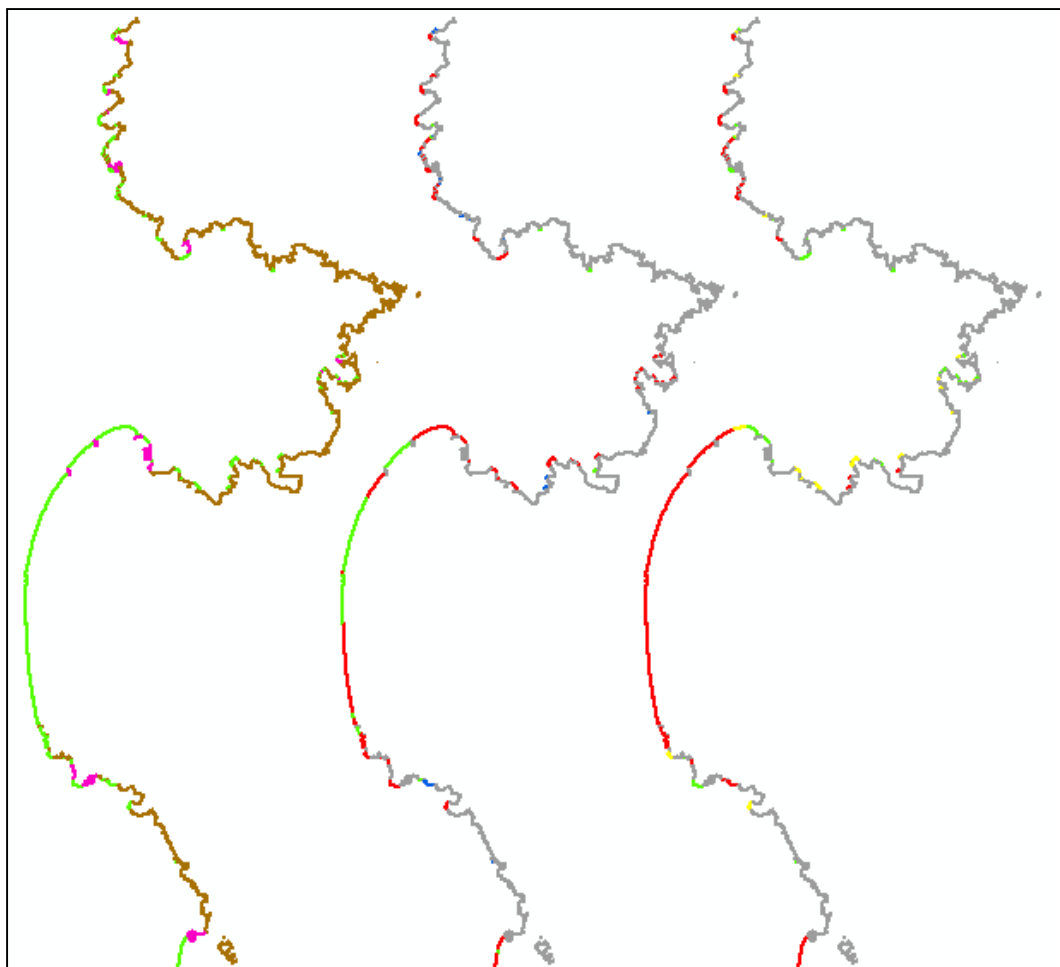


Figura 11: Líneas de la Costa Brava (Tramo 1). Etapa 1, 2 y Grado de Exposición

Etapa 1, Etapa 2 y Grado de exposición a temporal					
De izquierda a derecha:					
1. Borde		2. Hinterland		3. Grado de exposición	
—	Activo	—	Zona Sedimentaria	—	Zona Protegida
—	No Activo Natural	—	Sin Espacio Natural	—	Zona Semiprotegida
—	No Activo Antropológico	—	Sin Espacio Antropológico	—	Zona Expuesta
		—	No Activo en 1. Borde	—	No Activo en 1. Borde

En la figura 12 la zona más vulnerable actualmente del Golf de Roses es precisamente Roses (analizada en el ejemplo) y la parte sud del golfo, l'Escala. A los 25 años la mayor parte del golfo pasa a ser altamente vulnerable. Zonas altamente vulnerables como l'Escala o La Selva de Mar tienen construcciones en sus costas, El Port de la Clota y El Port de la Selva respectivamente, posibles desencadenantes de esta situación. A los 50 años la situación empeora. Al añadir el aumento del nivel del mar la vulnerabilidad se incrementa rápidamente y a los 10 años gran parte del golfo ya tiene una vulnerabilidad alta, pasando a una vulnerabilidad muy alta a los 25 años (Fig. 13). Este comportamiento es el esperable en zonas de perfil bajo como son las planicies.

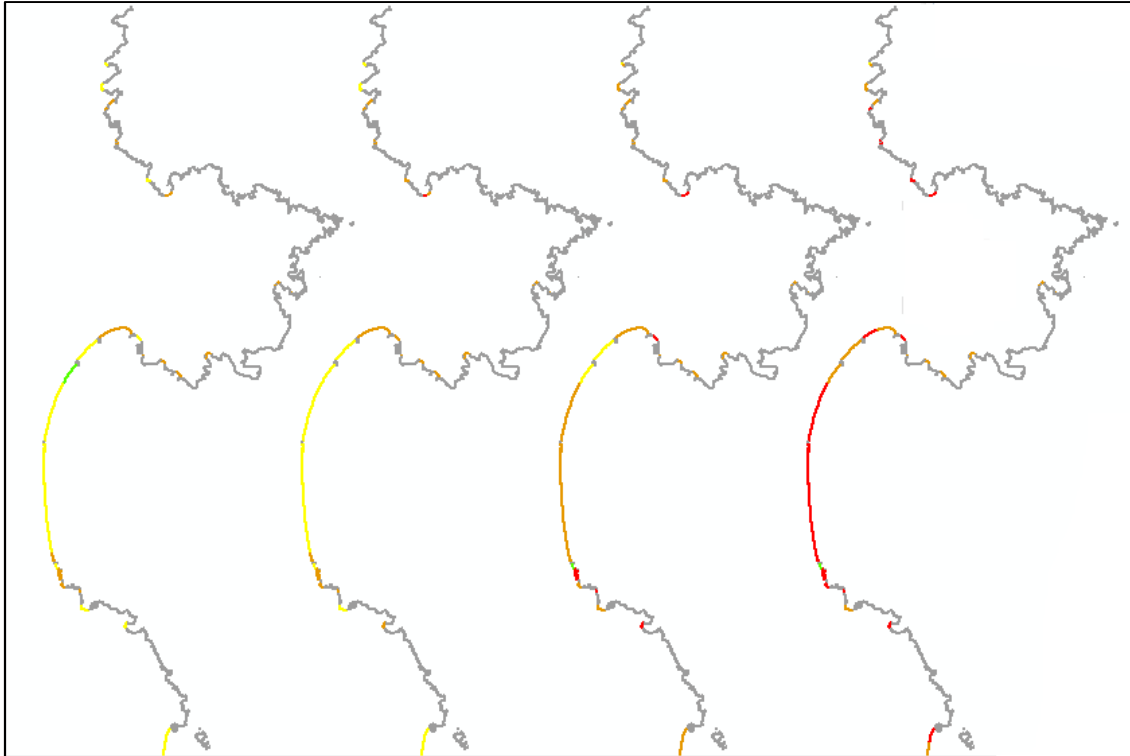


Figura 12: Líneas de la Costa Brava (Tramo 1). Vlnerabilidad frente a erosión sin SLR

<i>Vulnerabilidad frente a erosión (sin SLR)</i>			
<i>De izquierda a derecha</i>		<i>Leyenda Vulnerabilidad:</i>	
1. Vulnerabilidad actualmente		— Baja	— Alta
2. Vulnerabilidad en 10 años			
3. Vulnerabilidad en 25 años		— Media	— Muy Alta
4. Vulnerabilidad en 50 años			

En cuanto a inundaciones ya hemos comentado anteriormente que el caso de Blanes se puede extender a toda la costa catalana. A día de hoy, a todas las playas del litoral catalán se les atribuye como mínimo una vulnerabilidad alta que se mantiene a lo largo de los años (Ver Fig. 14). La costa catalana tiene problemas en lidiar con las inundaciones provocadas por temporales extremos (como ya se ha comentado en ocasiones anteriores para este trabajo se han escogido las características de una tormenta con un período de retorno de 50 años).

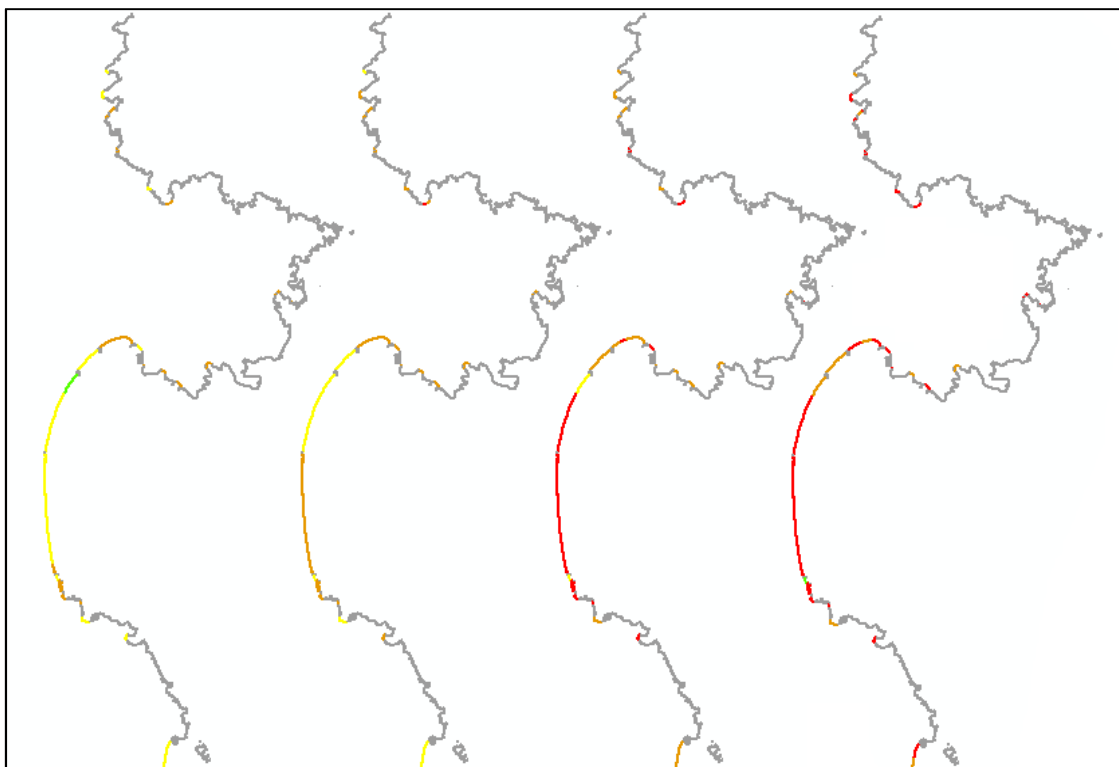


Figura 13: Líneas de la Costa Brava (Tramo 1). Vulnerabilidad frente a erosión con SLR

<i>Vulnerabilidad frente a erosión con SLR</i>			
<i>De izquierda a derecha</i>		<i>Leyenda Vulnerabilidad:</i>	
<i>1. Vulnerabilidad actualmente</i>		<i>Baja</i>	<i>Alta</i>
<i>2. Vulnerabilidad en 10 años</i>			
<i>3. Vulnerabilidad en 25 años</i>		<i>Media</i>	<i>Muy Alta</i>
<i>4. Vulnerabilidad en 50 años</i>			

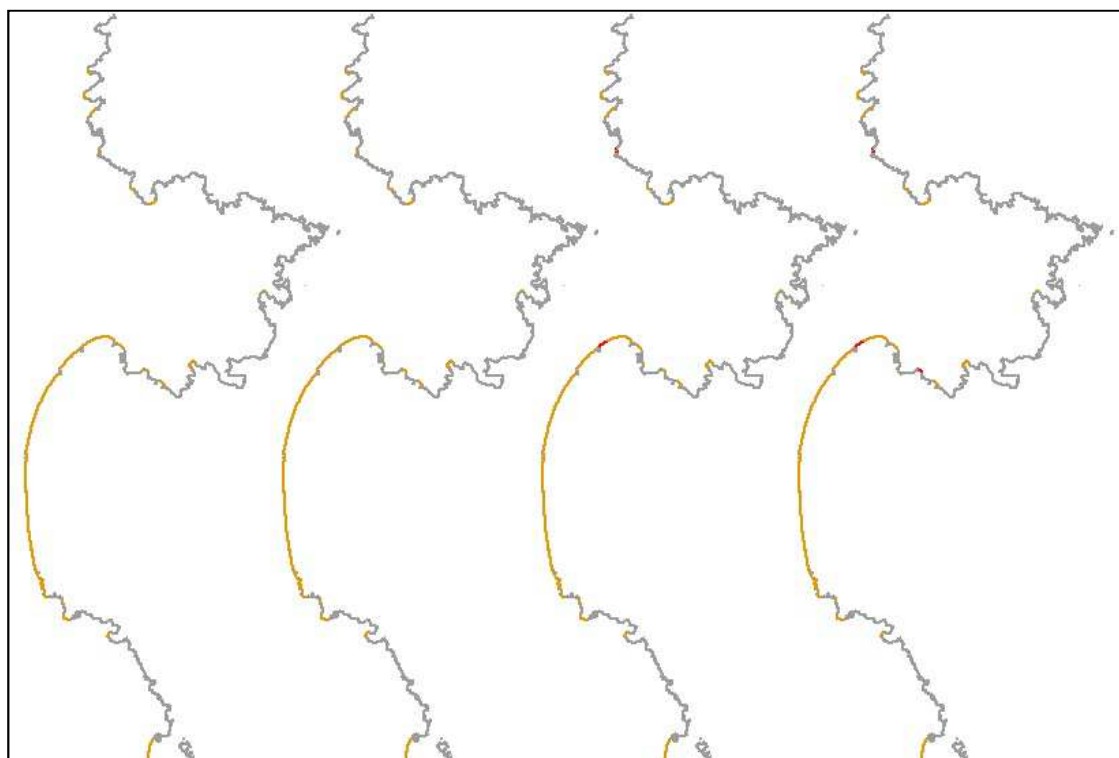


Figura 14: Líneas de la Costa Brava (Tramo 1). Vulnerabilidad frente a inundación

<i>Vulnerabilidad frente a inundación</i>	
<i>De izquierda a derecha</i>	<i>Leyenda Vulnerabilidad:</i>
1. Vulnerabilidad actualmente	■ <i>Baja</i> ■ <i>Alta</i>
2. Vulnerabilidad en 10 años	
3. Vulnerabilidad en 25 años	■ <i>Media</i> ■ <i>Muy Alta</i>
4. Vulnerabilidad en 50 años	

4.3 Costa Brava (Tramo 2), de L'Estartit a Blanes

El segundo tramo de la Costa Brava sigue la misma temática que el primero. Las zonas rocosas y no activas abundan y tenemos varias zonas sedimentarias. La primera nos la encontramos bajando desde l'Estartit. En esta zona se encuentran además Els Aiguamolls del Baix Empordà que permiten la evolución libre de las playas hacia dentro del territorio. Otras playas importantes serían Palamós, Platja d'Aro, Tossa de Mar y Lloret de Mar. En este tramo las zonas activas también cuentan con grandes construcciones costeras como puertos y diques. La mayoría de las playas de estas zonas están directamente expuestas a temporales (Fig. 15).

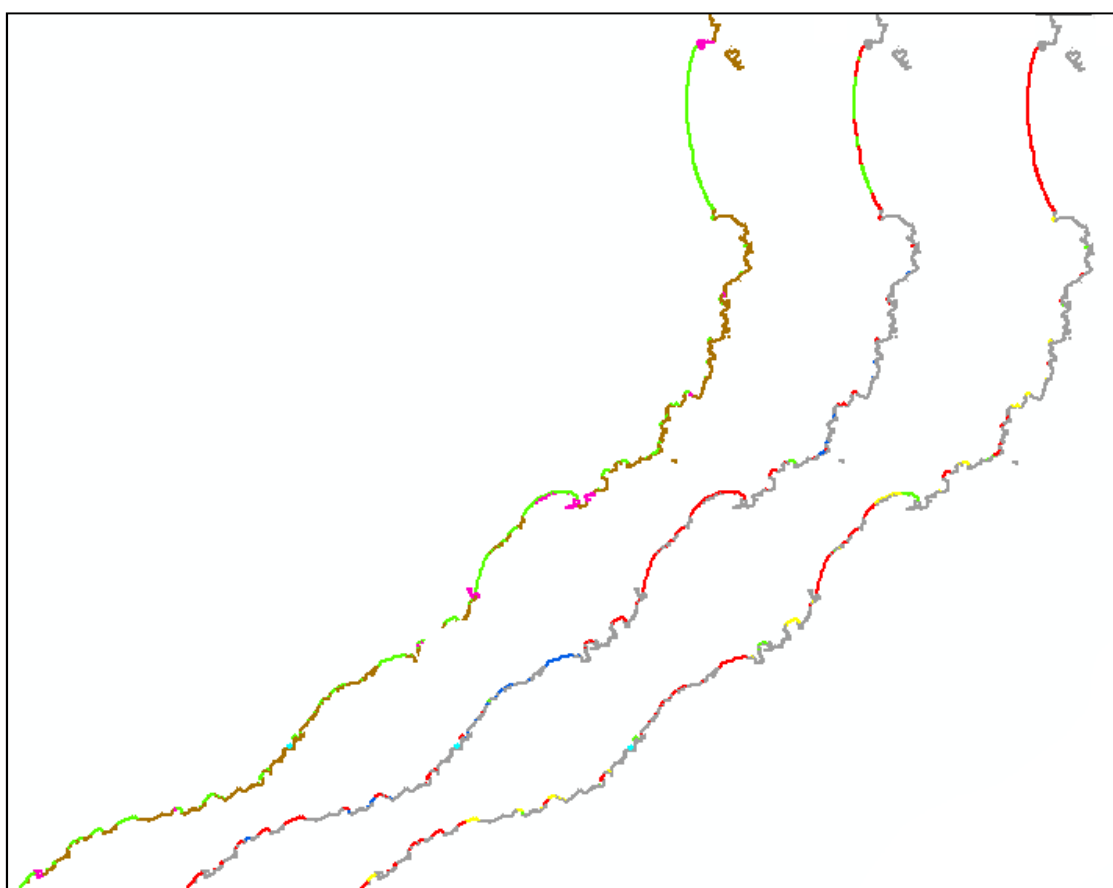


Figura 15: Líneas de la Costa Brava. Etapa 1, 2 y exposición a temporales.

Etapa 1, Etapa 2 y Grado de exposición a temporal					
De izquierda a derecha:		1. Borde		2. Hinterland	
	Activo		Zona Sedimentaria		Sin Espacio Antropológico
	No Activo Natural		Sin Espacio Natural		No Activo en 1.Borde
	No Activo Antropológico				Zona Protegida
					Zona Semiprotegida
					Zona Expuesta
					No Activo en 1.Borde

Al observar los resultados, se detecta rápidamente (Figura 16) que su vulnerabilidad frente a erosión es baja. Aún así hay zonas con vulnerabilidad media y alta. En la gran extensión de playa que va desde l'Estartit a Sa Riera hay un pueblo, Els Griells, cuya playa empieza a ser altamente vulnerable a los diez años y esta zona aumenta su vulnerabilidad a medida que pasan los años. Las playas cercanas a Tossa de Mar también van aumentando significativamente su vulnerabilidad progresivamente con los años. Al añadir la subida del nivel del mar las playas de la zona de Palamós y Platja d'Aro se ven más afectadas pasando a tener una vulnerabilidad muy alta a los 25 años.

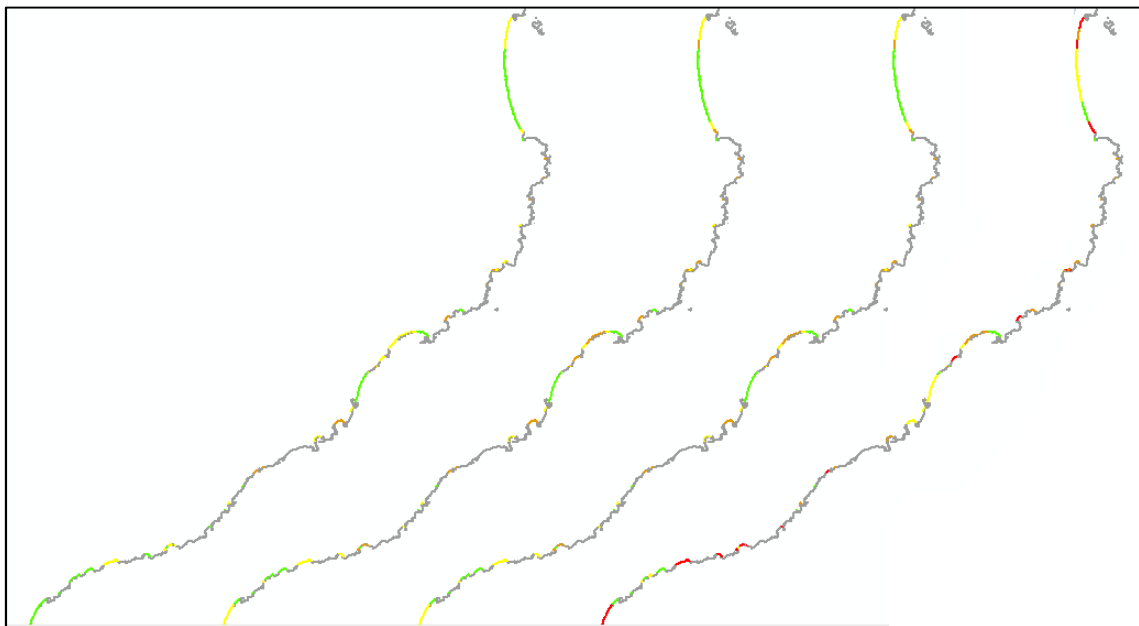


Figura 16: Líneas de la Costa Brava (Tramo 2). Vulnerabilidad frente a erosión sin SLR

<i>Vulnerabilidad frente a erosión (sin SLR)</i>			
<i>De izquierda a derecha</i>		<i>Leyenda Vulnerabilidad:</i>	
1. Vulnerabilidad actualmente		— Baja	— Alta
2. Vulnerabilidad en 10 años			
3. Vulnerabilidad en 25 años		— Media	— Muy Alta
4. Vulnerabilidad en 50 años			

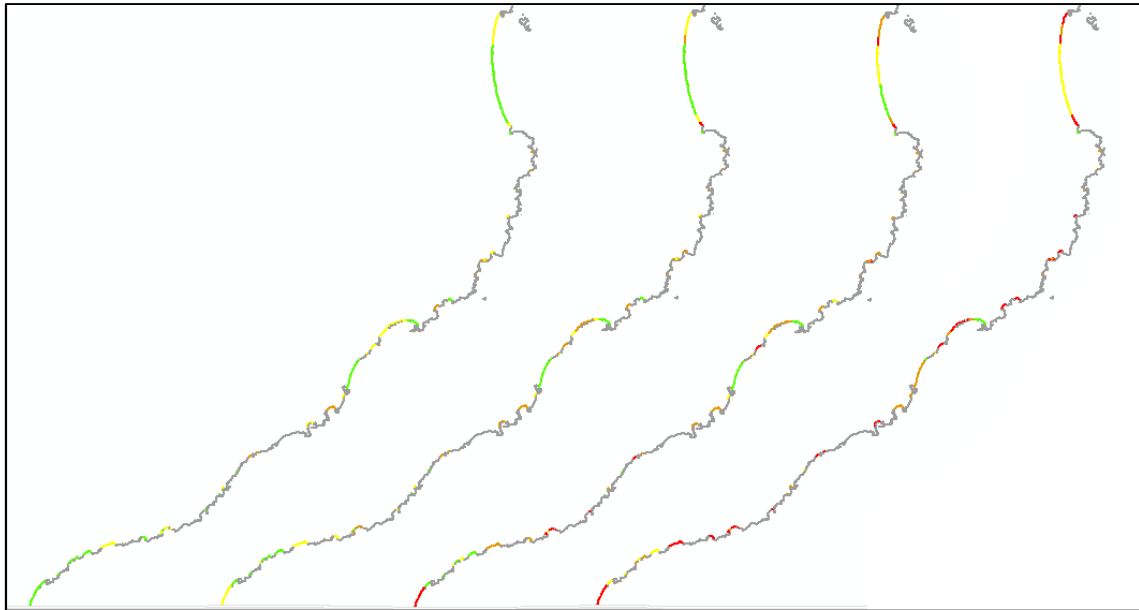


Figura 17: Líneas de la Costa Brava (Tramo 2). Vulnerabilidad frente a erosión con SLR

Vulnerabilidad frente a erosión con SLR			
De izquierda a derecha		Leyenda Vulnerabilidad:	
1. Vulnerabilidad actualmente		■ Baja	■ Alta
2. Vulnerabilidad en 10 años			
3. Vulnerabilidad en 25 años		■ Media	■ Muy Alta
4. Vulnerabilidad en 50 años			

En cuanto a vulnerabilidad frente a inundaciones la única playa que no presenta una vulnerabilidad alta, sino media, es la playa de Platja d'Aro. Este tramo sigue la tendencia anterior, vulnerabilidad alta frente a inundaciones (Fig. 18).

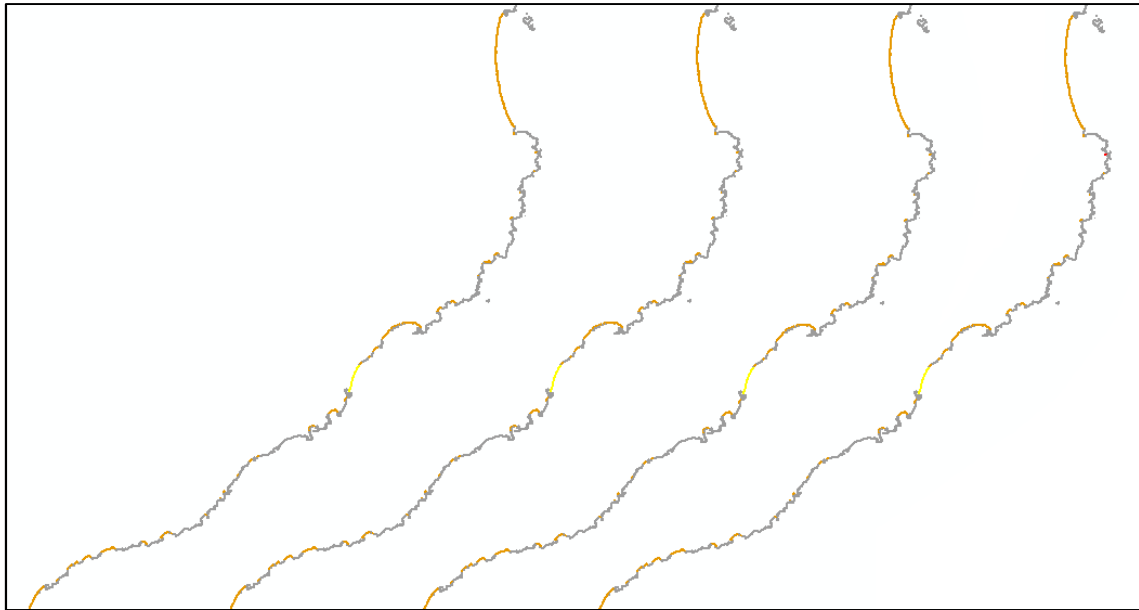


Figura 18: Líneas de la Costa Brava (Tramo 2). Vulnerabilidad frente a inundación.

<i>Vulnerabilidad frente a inundación</i>			
<i>De izquierda a derecha</i>		<i>Leyenda Vulnerabilidad:</i>	
1. Vulnerabilidad actualmente		/ Baja	/ Alta
2. Vulnerabilidad en 10 años			
3. Vulnerabilidad en 25 años		/ Media	/ Muy Alta
4. Vulnerabilidad en 50 años			

4.4. Maresme

En la Figura 19 vemos que el Maresme presenta una geomorfología completamente diferente al de la Costa Brava. Las zonas no sedimentarias naturales son inexistentes, todo es zona sedimentaria o bien construcciones costeras como puertos o espigones. Siguiendo en la Figura 19, la Etapa 2 nos indica que todo lo que hay detrás de las zonas sedimentarias está urbanizado y que toda la costa del Maresme está expuesta a temporales. De todos estos atributos puramente geomorfológicos, ya se puede deducir que la costa del Maresme tiene un perfil de vulnerabilidad más elevado que la Costa Brava.

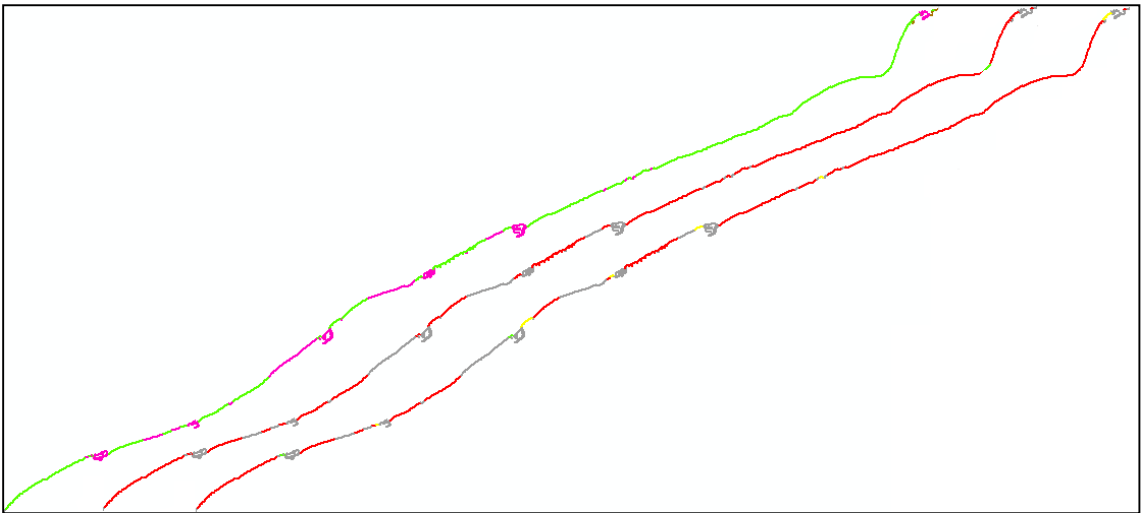


Figura 19: Líneas del Maresme. Etapa 1, 2 y grado de exposición a temporales.

Etapa 1, Etapa 2 y Grado de exposición a temporal			
De izquierda a derecha:			
1. Borde	2. Hinterland	3. Grado de exposición	
Activo	Zona Sedimentaria	Zona Protegida	Zona Expuesta
No Activo Natural	Sin Espacio Natural	Zona Semiprotegida	No Activo en 1.Borde
No Activo Antropológico	Sin Espacio Antropológico		
	No Activo en 1.Borde		

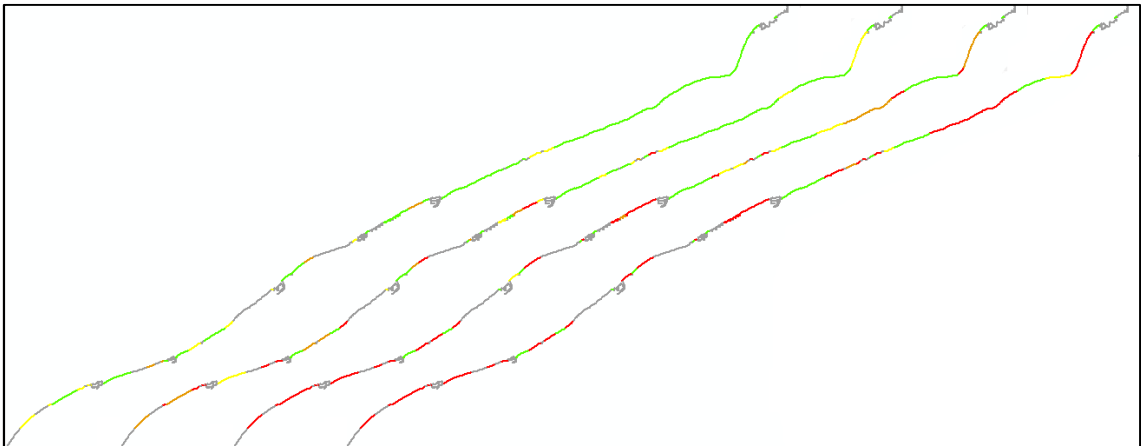


Figura 20: Líneas del Maresme. Vulnerabilidad frente a erosión sin SLR

Vulnerabilidad frente a erosión (sin SLR)			
De izquierda a derecha		Leyenda Vulnerabilidad:	
1. Vulnerabilidad actualmente		Baja	Alta
2. Vulnerabilidad en 10 años			
3. Vulnerabilidad en 25 años		Media	Muy Alta
4. Vulnerabilidad en 50 años			

Muchas de las zonas del Maresme clasificadas como playas en el “Llibre Verd” no aparecían en Google Maps como tal o tal vez aparecían con un ancho aparentemente menor al especificado. Esto podría deberse al efecto de la dinámica litoral sobre estas zonas durante los últimos años, que puede haber determinado su desaparición o erosión significativa. Estas zonas son, por ejemplo, los segmentos marcados en rosa (línea 1 figura 19) que no son puertos entre Arenys de Mar y Mataró, zonas al sur de las grandes infraestructuras portuarias. Estas zonas se han considerado directamente no activas.

Aparentemente la vulnerabilidad frente a erosión en el Maresme también es baja en la actualidad. El único lugar con una vulnerabilidad más elevada es Mataró, especialmente la zona aguas abajo de su puerto. Con el paso de los años las zonas que se vuelven más vulnerables son las que se encuentran por debajo de los grandes puertos. Hay zonas en rojo que serían la prolongación de lo que antes hemos dicho que sería activo según Llibre verd pero no activo según el satélite de google maps. Estas zonas son de especial atención dado que el segmento que las precede ha dejado de ser zona activa en 4 años. A largo plazo la costa del Maresme se convierte en una zona con alta vulnerabilidad y al añadir el aumento del nivel del mar el proceso se agudiza rápidamente.

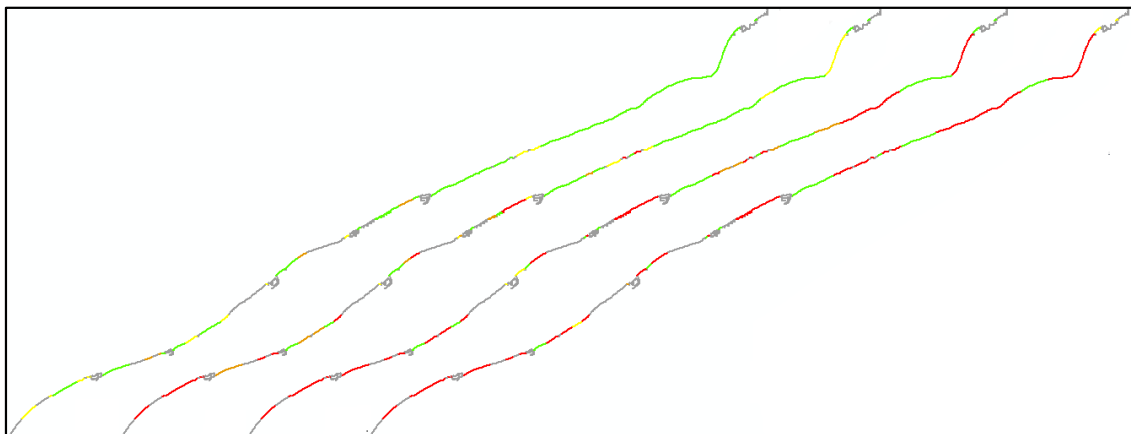


Figura 21: Líneas del Maresme. Vulnerabilidad frente a erosión con SLR

<i>Vulnerabilidad frente a erosión con SLR</i>			
<i>De izquierda a derecha</i>		<i>Leyenda Vulnerabilidad:</i>	
1. Vulnerabilidad actualmente		 Baja	 Alta
2. Vulnerabilidad en 10 años			
3. Vulnerabilidad en 25 años		 Media	 Muy Alta
4. Vulnerabilidad en 50 años			

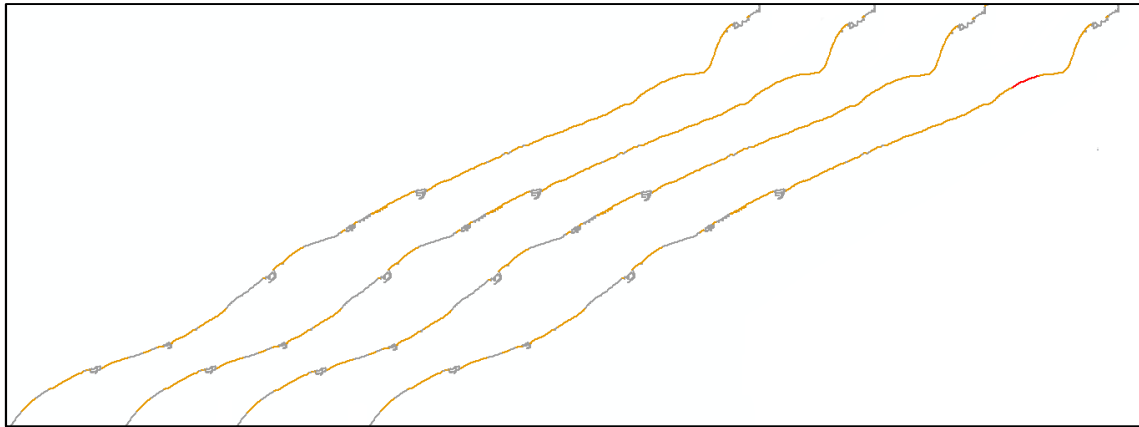


Figura 22: Líneas del Maresme. Vulnerabilidad frente a inundación.

<i>Vulnerabilidad frente a inundación</i>			
<i>De izquierda a derecha</i>		<i>Leyenda Vulnerabilidad:</i>	
1. Vulnerabilidad actualmente		■ Baja	■ Alta
2. Vulnerabilidad en 10 años			
3. Vulnerabilidad en 25 años		■ Media	■ Muy Alta
4. Vulnerabilidad en 50 años			

En cuanto a vulnerabilidad frente a inundaciones sucede lo mismo que en la Costa Brava. Toda la zona es altamente vulnerable a inundación.

Finalmente podríamos hacer una integración de las vulnerabilidades pero, después de ver los resultados, al integrar erosión con vulnerabilidades siempre altas de inundación obtendríamos vulnerabilidades también altas para toda el área de estudio. Además, de cara al gestor es interesante poder asignar la vulnerabilidad a procesos determinados ya que se corresponden con tiempos de respuesta diferentes y mecanismos diferentes que generan daños distintos. Para poder prevenir o actuar frente a estos daños se deben tomar decisiones enfocadas a una tipología de problema concreto. No es lo mismo erosión que inundación ni algo instantáneo, como una tormenta, con algo que afecta a la costa a largo plazo.

5. Discusión y Conclusiones

El método “smartline” propuesto por Sharples (2006) se puede perfectamente adaptar a las características de cada costa y a los datos de los que se disponen. Gracias a su versatilidad para poder incluir información de cualquier tipo y su facilidad para combinar éstos, el método *smartline* se convierte en una herramienta relativamente rápida que puede ser adaptado a cualquier método de evaluación de la vulnerabilidad, facilitando tanto el manejo de los datos como la presentación de los resultados de forma visual, lo cual aunque pueda parecer una cuestión formal, es sumamente necesaria en el proceso de transferir la información a los tomadores de decisiones (Administración).

A pesar de las diferencias geomorfológicas entre las dos zonas estudiadas se aprecian ciertas similitudes en los resultados. En todos los casos hemos visto como el litoral catalán es altamente vulnerable a las inundaciones provocadas por las olas en una tormenta. La probabilidad de ocurrencia escogida ha sido la correspondiente a una tormenta con un período de retorno de 50 años, con la que cualquiera de las playas estudiadas quedaría potencialmente afectada (temporalmente cubierta e inundada). La continua aparición en los últimos años de eventos de este tipo a lo largo de la costa catalana y estos resultados obtenidos aquí, parecen sugerir la necesidad de valorar si es necesario una solución a largo plazo. En cualquier caso, hay que considerar que en este trabajo solo valoramos la vulnerabilidad física, y que para decidir si hay que buscar alguna solución o no, habría que incluir las consecuencias socio-económicas de los procesos analizados.

En cuanto a la erosión, a día de hoy las zonas más vulnerables son aquellas que se encuentran debajo de construcciones costeras como los puertos. Las playas que se encuentran en esta situación peligran, especialmente en el Maresme, dónde anteriormente ya se ha comentado que en 4 años ya han desaparecido segmentos de playas. Por otro lado, a largo plazo la situación empeora, en 10 años se detectan zonas que pasan de tener una vulnerabilidad baja a una alta, especialmente en el Maresme. A medida que pasa el tiempo las vulnerabilidades altas se expanden y tanto en la Costa Brava como en el Maresme a los 10 años ya se pueden ver diferencias notables.

Gracias a la diferenciación entre erosión con y sin el aumento del nivel del mar, se puede ver como éste afecta a la vulnerabilidad de las playas a partir de los 10 años, es decir, que sus efectos empeoran la vulnerabilidad de la costa catalana y en un período no muy alejado estos efectos empezarían a poner en riesgo algunas zonas más rápidamente.

La Costa del Maresme es claramente más vulnerable que la Costa Brava, aun así hay zonas en la Costa Brava como el Golf de Roses cuya vulnerabilidad sigue un esquema similar al de las costas del Maresme.

Por último, se puede concluir que la aplicabilidad del método es muy alta y, dada su versatilidad es absolutamente recomendable usar una aproximación así para analizar la vulnerabilidad costera. En este trabajo se ha hecho un análisis de 2 zonas representativas de la costa catalana y, dados los resultados obtenidos, se recomienda extenderlo a la totalidad de la costa. Los procesos analizados han sido escogidos como ejemplo de los más importantes, sin embargo pueden extenderse incluso a otro tipo de procesos no necesariamente ligados a la estabilidad física (contaminación, degradación ambiental) que permitirían la evaluación de una vulnerabilidad global.

6. Referencias

- Adger, W.N.; Brooks, N.; Bentham, G.; Agnew, M.; Eriksen, S. (2004) New indicators of vulnerability and adaptive capacity. Tyndall Centre for Climate Change Research. Technical Report 7: Final Project Report).
- Athanasios T. Vafeidis et al. (2008) A New Global Coastal Database for Impact and Vulnerability Analysis to Sea-Level Rise. *Journal of Coastal Research: Volume 24, Issue 4*: pp. 917-924.
- Bird, E.C.F., (1985). *Coastline Changes*. Wiley & Sons, New York, 219 pp.
- Bosom, E.; Jiménez, J. A. (2011). Probabilistic coastal vulnerability assessment to storms at regional scale – application to Catalan beaches (NW Mediterranean). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* (11): 475-484.
- Bromirski, P.D.; Flick, R.E.; Cayan, D.R. (2003). Storminess variability along the California coast: 1958-2000. *Journal of Climate*, (16): 982-993.
- CIIRC, (2010). *Estat de la zona costanera a Catalunya*. Department of Public Works. Generalitat of Catalonia. Barcelona.
- Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Gouldby, B. y Samuels, P. (2005). *Language of Risk. Project definitions*, FLOOD site Project Report T32-04-01, EU GOCE-CT-2004-505420, 2005
- Guillén, J. (2008) *Els Riscos Litorals a Catalunya*. Projecto RISKCAT 2008. Generalitat de Catalunya

- IPCC (2001). Climate Change 2001, Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2007). Climate Change 2007, The Physical Science Basis. A Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jiménez, J.A.; Sancho A.; Bosom, E.; Valdemoro, H. I.;, Guillén, J. (2012) Storm-induced damages along the Catalan coast (NW Mediterranean) during the period 1958-2008. *Geomorphology* 143-144: 24-33.
- Kron, W. (2013) Coasts: the high-risk areas of the world. *Natural Hazards* (66): 1363-1382.
- Martí, M. (2011) Vulnerabilidad Física de la Costa Catalana a Diferentes Agentes. Tesina D'Especialitat. ETSCCPB-UPC Barcelona. Disponible en: upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/13897/1/Memoria.pdf (Acceso Junio 2014)
- Lins-de-Barros, F.M.; Muehe, D. (2011) The smartline approach to coastal vulnerability and social risk assessment applied to a segment of the east coast of Rio de Janeiro State, Brazil. *Journal of Coastal Conservation* 12/2011; DOI:10.1007/s11852-011-0175-y
- Llibre Verd (2010) Llibre verd de l'Estat de la zona costanera a Catalunya, 2010. Disponible en: http://www.igc.cat/web/es/costa_lvzcc.html (Acceso Junio 2014)
- Mendoza, E.T.; Jiménez, J.A. (2006) Storm-Induced Beach Erosion Potencial on the Catalanian Coast, *J. Coast. Res.*, SI (48):81-88.
- Özyurt, G. (2007) Vulnerability of coastal areas to sea level rise: a case of study on Göksu Delta. Thesis submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle-East Technical University. Disponible en: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12608146/index.pdf> (Acceso Junio 2014)
- Özyurt, G; Ergin, A.; Esen, M. (2008) Indicator based coastal vulnerability assessment model to sea level rise. Paper presented at the Seventh International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries COPEDEC VII "Best Practices in the Coastal Environment", 24-28, Dubai, UAE.

Ramieri, E.; Hartley, A.; Barbanti, A; Santos, F.D.; Gomes, A.; Hilden, M. Laihonon, P.; Marinova, N.; Santini, M. (2011) Methods for assessing coastal vulnerability to climate change, ETC CCA Technical Paper 1/2011, European Environment Agency, European Topic Centre on Climate Change Impacts, Vulnerability and Adaptation.

Sharples, C. (2006) Indicative mapping of Tasmanian Coastal Geomorphic vulnerability to sea-level rise using GIS line map of coastal geomorphic Attributes.

Sharples,C.; Mount, R.; Pedersen, T. (2009). The Australian coastal Smartline geomorphic and stability map version 1: manual and data dictionary. School of Geography & Environmental Studies, University of Tasmania 8th October 2009 Manual version 1.1.

USGCRP: U.S. Global Change Research Program (2013) Highlight of Climate Change Impacts in the United States. Disponible en: http://www.ccass.arizona.edu/sites/default/files/NCA_Regiones%20Costeras%20.pdf (Acceso en Junio 2014)

Gouldby, B. y Samuels, P.2005. *Language of Risk. Project definitions*, FLOOD site Project Report T32-04-01, EU GOCE-CT-2004-505420, 2005

